

# Evaluación del monitoreo de la contaminación atmosférica en Bogotá, Colombia

Informe técnico del Laboratorio de Investigación de Greenpeace, abril de 2021

Dr Aidan Farrow<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Investigación de Greenpeace, Facultad de Ciencias de la Vida y el Medio Ambiente, Centro de Innovación Fase 2, Universidad de Exeter, Exeter, Reino Unido

## Contenido

Introducción	1
Descripción general de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire	3
Ubicación del sitio y exposición de la población	5
Clasificación del sitio	5
Distancia a la exposición reveladora	6
Monitoreo en altura	9
Conclusiones	10
Referencias	10

## Introducción

Una amplia variedad de componentes provenientes de productos químicos y sustancias contribuyen a la contaminación del aire. Los contaminantes pueden ser gases, como el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), vapores dañinos o partículas diminutas de material sólido o líquido que se han suspendido en el aire (llamadas material particulado). El recuadro 1 describe brevemente los contaminantes del aire que se analizan en este informe.

### Cuadro 1: Tipos de contaminación del aire

#### Material particulado (PM<sub>30</sub> y PM<sub>2.5</sub>)

Contaminación en forma de pequeñas partículas líquidas o sólidas suspendidas en la atmósfera. Este tipo de contaminación se describe de acuerdo con el tamaño de las partículas, en lugar de la sustancia química que contienen. PM<sub>10</sub> se refiere a partículas que tienen menos de 10 micrómetros de ancho, a veces conocidas como partículas gruesas o partículas suspendidas respirables (RSP por sus siglas en inglés) porque pueden inhalarse hacia los pulmones. PM<sub>2.5</sub> se refiere a partículas que tienen menos de 2.5 micrómetros de ancho, a veces conocidas como partículas finas en suspensión (FSP por sus siglas en inglés). Las partículas son lo suficientemente pequeñas como para atravesar la barrera pulmonar y entrar en el sistema sanguíneo.

#### Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

Contaminante del aire gaseoso producido por la quema de combustible que contiene azufre. Esto puede incluir combustibles fósiles como carbón y petróleo. El dióxido de azufre es tóxico y se ha relacionado con muchos impactos en la salud. El dióxido de azufre también puede reaccionar con la humedad del aire provocando lluvia ácida.

#### **Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)**

Un contaminante atmosférico gaseoso producido por todos los procesos de combustión, incluido el uso de combustibles fósiles en vehículos y centrales eléctricas. El dióxido de nitrógeno es tóxico y se ha relacionado con muchos impactos en la salud. El dióxido de nitrógeno también puede reaccionar con la humedad del aire causando lluvia ácida, y en presencia de luz solar y COV (ver más abajo) puede contribuir a la formación de ozono a nivel del suelo, a veces llamado smog fotoquímico.

#### **Ozono (O<sub>3</sub>)**

El ozono a nivel del suelo es un contaminante gaseoso que se forma en la atmósfera cuando reaccionan otros contaminantes como el NO<sub>2</sub> y los COV. Contribuye al daño de la lluvia ácida, puede dañar plantas y cultivos y puede causar problemas respiratorios en las personas. Es tóxico para los humanos.

#### **Compuestos orgánicos volátiles (COV)**

Estos son productos químicos que contienen carbono y que se evaporan fácilmente. Una fuente importante de COV que conduce a la contaminación del aire es la evaporación de los combustibles fósiles durante el uso, almacenamiento y transporte. Muchos COV son tóxicos para los humanos.

Las principales fuentes de contaminación atmosférica dentro del área de estudio son las emisiones de fuentes móviles (transporte por carretera), la resuspensión de material particulado (polvo), la industria y las actividades comerciales (Pachón et al., 2018). Un inventario de emisiones en Bogotá para el año 2012 encontró que las fuentes móviles dominaban las emisiones de CO<sub>2</sub> (80%), CO (99%), COV (68%), NO<sub>x</sub> (95%) y SO<sub>2</sub> (85%). Los estudios de emisiones más recientes continúan encontrando que las emisiones de fuentes móviles dominan; por ejemplo, se estima que aproximadamente el 80% de las partículas PM<sub>2.5</sub> son generadas por fuentes móviles mientras que el 20% restante son aportadas por fuentes fijas (SIAC, 2018).

Las regulaciones nacionales colombianas proporcionan el marco de políticas para la gestión de la calidad del aire en Bogotá. Estas regulaciones establecen umbrales para las concentraciones diarias promedio de contaminantes atmosféricos clave (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia [Resolución 2254 MADS], 2017) (Tabla 1). La Organización Mundial de la Salud también publicó Pautas de calidad del aire (Tabla 1), que son un punto de referencia ampliamente utilizado para evaluar la calidad del aire, con respecto a minimizar los impactos en la salud. En la mayoría de los casos, las pautas de la OMS son más estrictas que las descritas en las regulaciones locales colombianas.

**Tabla 1: Niveles máximos permitidos para contaminantes de criterio seleccionados en el aire, Resolución MADS 2254 (2017) y Directrices de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (2005)**

Contaminante	Resolución MADS 2254		Directrices OMS		Comparación con la resolución MADS
	Concentración (Hg/m <sup>3</sup> )	Periodo promedio	Concentración (Hg/m <sup>3</sup> )	Periodo promedio	
PM <sub>30</sub>	50	Anual	20	Año calendario	OMS más fuerte
	100	24 horas	50	24 horas	OMS más fuerte
PM <sub>2.5</sub>	25	Anual	10	Año calendario	OMS más fuerte
	50	24 horas	25	24 horas	OMS más fuerte
	50	24 horas	20	24 horas	OMS más fuerte

SO<sub>2</sub>

	100	1 hora	500	10 minutos	Sin comparación directa
NO <sub>2</sub>	60	Anual	40	Año calendario	OMS más fuerte
	200	1-hora	200	1 hora	Igual
O <sub>2</sub>	100	9 - horas	100	8-horas	Igual

\*Fuente: Secretaría Distrital de Medio Ambiente<sup>1</sup>

## Descripción general de la red de monitoreo de la calidad del aire

La Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) está conformada por estaciones de monitoreo en distintas zonas de la ciudad, es operada en Bogotá por la Secretaría de Ambiente del Distrito<sup>1</sup>. Incluye 13 estaciones de monitoreo automáticas fijas y una estación móvil. Desde 1998, la red de monitoreo ha medido niveles de contaminantes que incluyen PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> (Mura et al., 2020).

Para el estudio actual, se obtuvieron las concentraciones medias por hora medidas de NO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> para todas las estaciones y los sitios de monitoreo que operan como parte de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) que reportan los diferentes tipos de contaminantes (Tabla 2, Mapa 1).<sup>2</sup> Los resultados del monitoreo oficial se descargaron del sitio web de la Secretaría de Ambiente del Distrito de Bogotá<sup>3</sup>. Las concentraciones medias anuales se muestran en la Tabla 3 y revelan que, si bien los monitores de contaminación rara vez registran excedencias de los niveles medios anuales de las guías de la OMS para NO<sub>2</sub>, la concentración media anual para tanto PM<sub>2.5</sub> como PM<sub>10</sub> exceden regularmente las pautas de la OMS. El sobrepaso de los estándares descritos en la Resolución MADS 2254 son menos frecuentes porque estos estándares son menos estrictos.

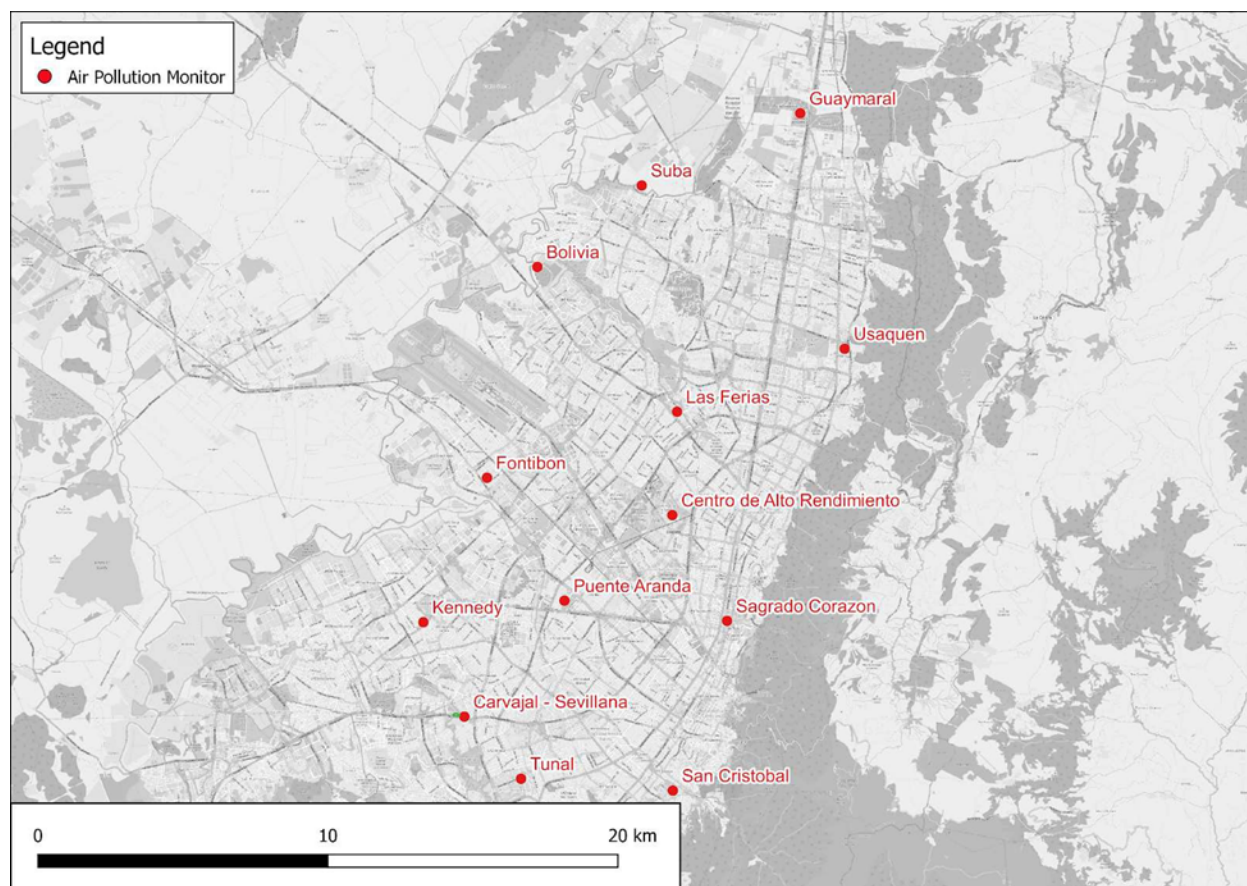
**Tabla 2: Estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB)**

Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Altura de muestreo desde el suelo (m)	Tipo de estación
Bolivia	4.74	-74.13	2574	4.6	Fondo
Carvajal-Sevillana	4.60	-74.15	2563	6	Tráfico Industrial
Centro de Alto Rendimiento	4.66	-74.08	2577	4.6	Fondo
Fontibón	4.67	-74.14	2591	15	Industrial
Guaymaral	4.78	-74.04	2580	4	Fondo
Kennedy	4.63	-74.16	2580	7	Fondo
Las Ferias	4.69	-74.08	2552	4.6	De tráfico
Puente Aranda	4.63	-74.12	2590	13	Industrial
San Cristóbal	4.57	-74.08	2688	4	Fondo
San Cristóbal	4.57	-74.08	2688	4	Fondo
Suba	4.76	-74.09	2571	9	Fondo
Tunal	4.58	-74.13	2589	3	Fondo
Usaquén	4.71	-74.03	2570	13	Fondo
Sagrado Corazón	Los datos del Sagrado Corazón no están disponibles para descargar				

<sup>1</sup> Secretaría Distrital de Medio Ambiente. 2021. <http://www.ambientebogota.gov.co/> (Consultado el 10 de marzo de 2021)

<sup>2</sup> Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá. <http://ambienteBogotá.gov.co/estaciones-rmcab> Consultado 04/09/2021

<sup>3</sup> Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá. <http://201.245.192.252:81/report/MonitorReport> Consultado el 11/03/2021



Mapa 1: Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB)

Tabla 3: Concentraciones medias anuales de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) para 2020 y 2019 \*

Estación	2020			2019		
	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
Bolivia	Faltan Datos	Faltan Datos	Faltan Datos	Faltan Datos	Faltan Datos	Faltan Datos
Centro de Alto Rendimiento	25.6	21.5	13.3	28.4	27.1	14.9
Guaymaral	20.4	25.7	13.5	29.0	24.7	13.5
Kennedy	35.1	41.1	21.4	Faltan Datos	43.7	<u>25.1</u>
San Cristóbal	Faltan Datos	23.5	11.9	Faltan Datos	24.9	Faltan Datos
Suba	Faltan Datos	34.2	14.7	Faltan Datos	45.8	16.1
Tunal	28.9	36.4	14.5	27.2	33.6	15.7
Usaquén	Faltan Datos	Faltan Datos	13.4	Faltan Datos	24.8	14.0
Fontibón	30.9	33.7	19.6	40.8	37.2	18.4

Puente Aranda	33.2	34.2	20.5	35.9	40.0	Faltan Datos
Las Ferias	30.1	23.6	13.6	33.0	28.3	12.8
Carvajal-Sevillana	48.4	<u>63.7</u>	<u>29.1</u>	<u>43.3</u>	<u>57.7</u>	<u>36.2</u>
<b>Unidades</b>	<b>ug/m<sup>3</sup></b>	<b>ug/m<sup>3</sup></b>	<b>ug/m<sup>3</sup></b>	<b>ug/m<sup>3</sup></b>	<b>ug/m<sup>3</sup></b>	<b>ug/m<sup>3</sup></b>
Directriz de la OMS	40	20	10	40	20	10
Resolución MADS 2254	60	50	25	60	50	25

\* Valores excluidos cuando la disponibilidad de datos era inferior al 75%. El sobrepaso de las directrices de la OMS se muestran en **negrita**. El sobrepaso de la Resolución MADS 2254 se muestran subrayadas.

## Ubicación del sitio y exposición de la población

### Clasificación del sitio

La calidad del aire urbano puede cambiar significativamente en distancias cortas, lo que significa que la ubicación de los monitores o estaciones de calidad del aire tiene el potencial de afectar significativamente las concentraciones medidas. Este efecto es más pronunciado para contaminantes gaseosos reactivos como el NO<sub>2</sub>. Una vez liberados a la atmósfera, los óxidos de nitrógeno reaccionan con otras sustancias químicas presentes en el aire, especialmente en presencia de luz solar. Esto puede dar lugar a la formación de otros contaminantes, como el ozono a nivel del suelo (véase el recuadro 1). Como resultado, las concentraciones pueden ser significativamente más altas cerca de fuentes de emisión, como avenidas y calles, y caer rápidamente al aumentar la distancia desde la fuente. Cuando las concentraciones de contaminación están dominadas por una fuente fija, se pueden observar grandes cambios en distancias de unos pocos metros. En algunas circunstancias, las concentraciones pueden caer hasta un 50% dentro de los primeros 10 metros desde una fuente, y la disminución es más lenta al aumentar la distancia, siguiendo una curva exponencial. El efecto es menos pronunciado para las partículas.

La interpretación de los datos de los monitores de contaminación se facilita clasificando los monitores según su ubicación y las fuentes de contaminación que los rodean. Como ilustración, la Tabla 4 describe el sistema de clasificación utilizado por el Departamento de Medio Ambiente, Agricultura y Asuntos Rurales del Reino Unido (DEFRA 2021) y la Directiva de Calidad del Aire de la Unión Europea 2008/50/EC.

**Tabla 4. Clasificación de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire**

Nombre		Descripción
Tráfico Urbano	Calles, avenidas o Acera	Sitios en un área urbana al menos a 25 metros del borde de las principales Cruces y a no más de 10 metros de la acera
Fondo urbano	Fondo urbano para centro urbano	Sitios en un área urbana alejados de las avenidas principales que son representativos de la exposición de la población en general. Los sitios urbanos de fondo no deben estar dominados por fuentes únicas y deben ser representativos de un área amplia.
Fondo suburbano	Suburbano	Sitios en un área suburbana alejados de las avenidas principales que son representativos de la exposición de la población en general. Un área suburbana se define como un tipo de ubicación situada en un área residencial en las afueras de un pueblo o ciudad. Los sitios de fondo suburbano no deben estar dominados por fuentes únicas y deben ser representativos de un área amplia.

Fondo rural	Rural	Sitios en una zona rural alejados de avenidas que sean representativos de la exposición de la población en general. Los sitios de fondo rural no deben verse influenciados por aglomeraciones o fuentes industriales y deben ser representativos de un área amplia.
Industrial urbano	Industrial	Sitio en una zona residencial urbana a favor del viento de una fuente industrial específica
Industrial suburbano	Industrial	Sitio en un área suburbana a favor del viento de una fuente industrial específica. Un área suburbana se define como un tipo de ubicación situada en un área residencial en las afueras de un pueblo o ciudad

### Distancia a la exposición relevante

De las 13 estaciones de monitoreo operadas por la Secretaría de Ambiente del Distrito de Bogotá, 8 se describen como Estaciones de fondo. Estos monitores están ubicados lejos de las principales fuentes de contaminación y en algunos casos se encuentran a grandes alturas sobre el nivel del suelo (Tabla 2).

Los monitores restantes representan el tráfico o entornos industriales; estos son Carvajal-Sevillana (Tráfico-Industrial), Fontibón (Industrial), Las Ferias (Tráfico) y Puente Aranda (Industrial). Sin embargo, ninguno de estos monitores representa las peores ubicaciones de la ciudad. El análisis de imágenes satelitales ha sido posible para determinar la ubicación precisa del monitor en Fontibón, aunque esta monitorea una elevación de 15 metros se reduce a una ubicación en el peor de los casos (ver sección "Monitoreo en altura"). Todas las estaciones de monitoreo de tráfico o de la industria están ubicadas a más de 25 metros de la avenida significativa más cercana. Con referencia a los criterios del Reino Unido / Unión Europea descritos en la Tabla 4, es poco probable que estos monitores reflejen el impacto total del tráfico en la calidad del aire en Bogotá.

La relación entre las concentraciones medidas de NO<sub>2</sub> y la distancia de las avenidas con mucho tráfico se ha estudiado ampliamente en el Reino Unido (Air Quality Consultants, 2008). Las mediciones realizadas a diferentes distancias de avenidas con mucho tráfico en múltiples ubicaciones y estudios siguen una única relación definida, descrita por una reducción lineal en la influencia de la carretera con el logaritmo natural de la distancia desde la acera. En pocas palabras, cuando una carretera principal es la fuente dominante de emisiones de NO<sub>2</sub>, se pueden esperar concentraciones relativamente grandes de caídas en la concentración en distancias cortas de la carretera, con reducciones más graduales que continúan a distancias mayores.

Tomando como ejemplo la estación de monitoreo de tráfico en Carvajal, esta relación se ha utilizado para predecir la concentración probable de NO<sub>2</sub> en ubicaciones más cercanas. Esto es de particular importancia porque, en ambos lugares, los monitores de contaminación del aire se encuentran a una distancia de la avenida mayor que otros edificios, incluidos colegios, comercio y conjuntos residenciales donde, por lo tanto, es probable que los residentes estén expuestos a concentraciones de NO<sub>2</sub> más altas que las indicadas por los datos de seguimiento.

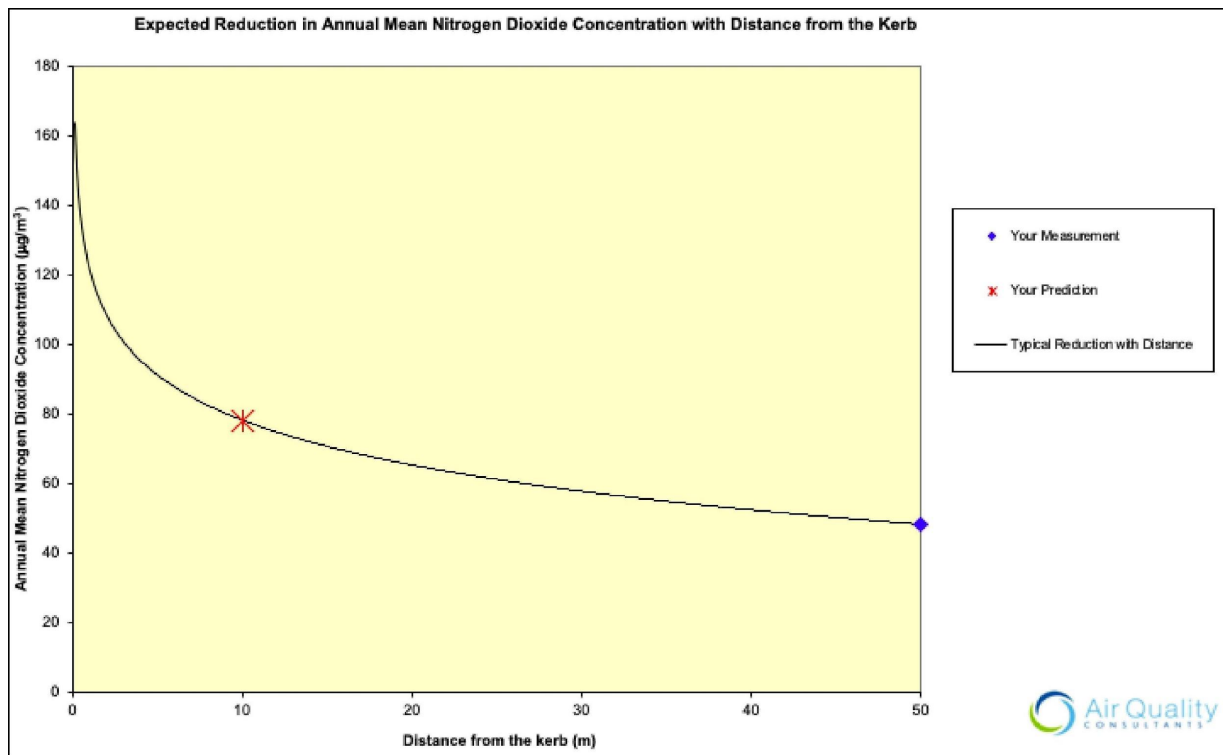
Utilizando las concentraciones medias anuales de NO<sub>2</sub> medidas en 2020 en Carvajal-Sevillana, se ha estimado la concentración media anual en lugares cercanos donde el público puede estar expuesto a la contaminación del aire en las avenidas (Tabla 5, Figura 1, 2 y Mapa 2). Se selecciona Carvajal-Sevillana porque es el único monitor de tráfico en Bogotá que se encuentra a menos de 50 metros de una carretera o vía principal y donde el muestreo está ubicado a menos de 10 metros sobre el suelo. El cálculo requiere una estimación del NO<sub>2</sub> de fondo. El resultado es sensible a la elección de las concentraciones de fondo y, por lo tanto, la estimación se repite utilizando los resultados de las dos estaciones de monitoreo de fondo más cercanas, Tunal y Kennedy.

Las estimaciones indican que los lugares dentro de Bogotá experimentan una calidad del aire considerablemente peor que la medida por la red de monitoreo de las ciudades. Además, muchos de estos lugares son lugares donde el público está expuesto al aire contaminado. Esto se ilustra claramente cerca del monitor Las Ferias, donde las

estaciones de monitoreo de tráfico están ubicadas aproximadamente a 150 metros de la carretera principal más cercana, pero muchas residencias y negocios están mucho más cerca (Mapa 3).

**Tabla 5. Concentración media anual estimada de NO<sub>2</sub> en un lugar al borde de la carretera con exposición relevante**

Monitor de tráfico	Distancia del monitor de tráfico a la carretera principal (m)	2020 Tráfico medio anual NO <sub>2</sub> (hg/m <sup>3</sup> )	Monitor de Fondo	2020 Media anual de fondo de NO <sub>2</sub> (hg/m <sup>3</sup> )	Distancia de exposición cercana a la carretera principal (m)	Exposición cercana prevista NO <sub>2</sub> (hg/m <sup>3</sup> )
Carvajal-S evillana	50	<b>48.4</b>	Tunal	28.9	10	78.3
			Kennedy	35.1		<b>68.8</b>
Directriz de la OMS						40



**Figura 1. NO<sub>2</sub> media anual medido en 2020 en Carvajal (Diamante Azul) y concentración proyectada en la exposición local cercana (Estrella Roja) utilizando concentraciones de fondo en Tunal**



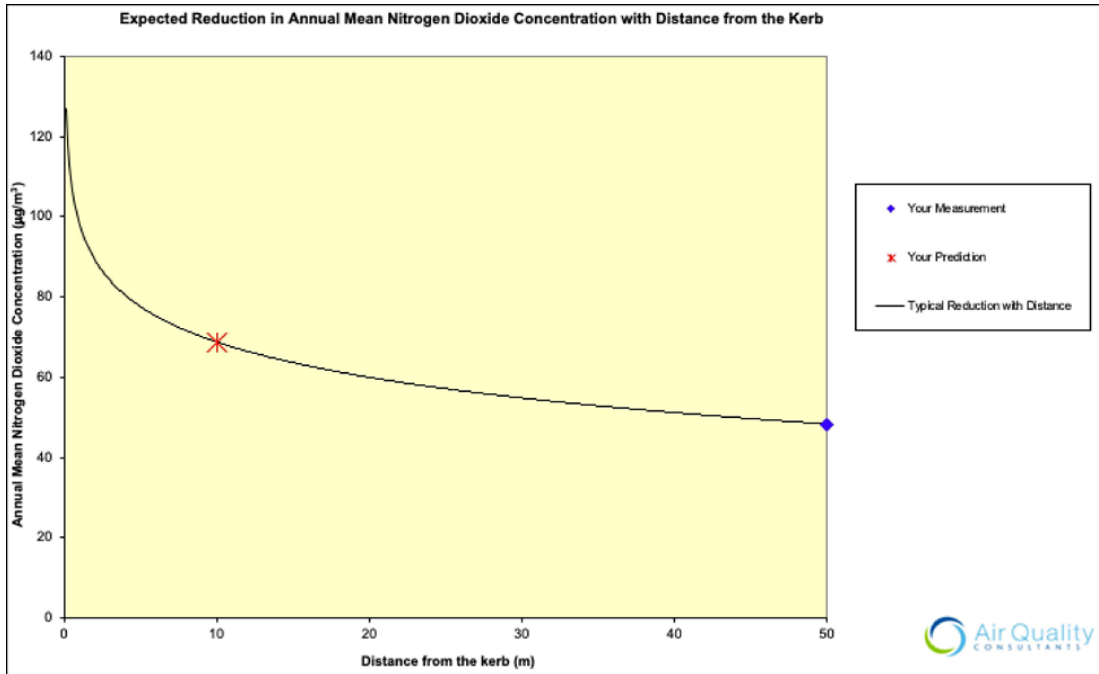


Figura 2. NO<sub>2</sub> media anual medida en 2020 en Carvajal (Diamante Azul) y concentración proyectada en la exposición local cercana (Estrella Roja) utilizando el fondo de las concentraciones de Ke



\*Datos del mapa: Bings Maps © 2021 Maxar, © 2021 TomTom

Mapa 2. Monitor de contaminación atmosférica de Carvajal-Sevillana y alrededores.





\*Datos del mapa: Bings Maps © 2021 Maxar, © 2021 TomTom

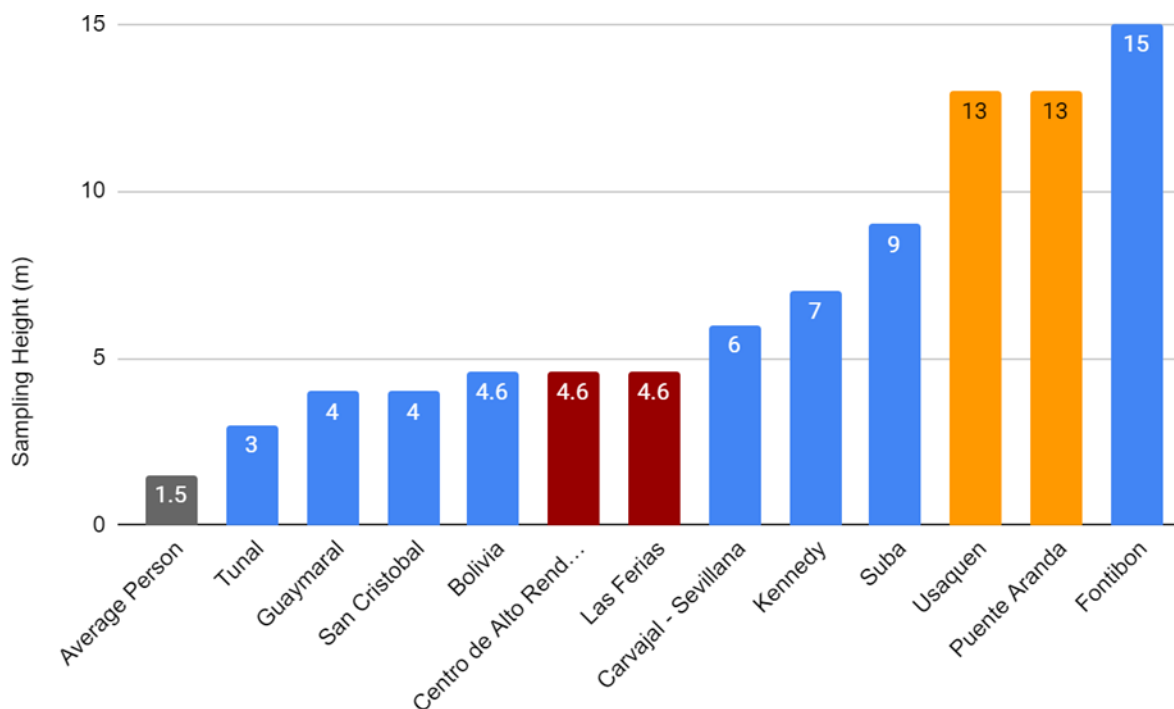
**Mapa 3. Monitor de contaminación atmosférica de Las Ferias y alrededores.**

### Monitoreo en altura

6 de los 13 estaciones de monitoreo de contaminación del aire en la red RMCAB están ubicados en los tejados, y 2 de ellos están a más de 10 metros sobre el nivel del suelo.<sup>4</sup> La mayoría de las entradas de registro de los monitores RMCAB son significativamente más altas que la altura a la que respiran las personas a pie de calle (Mapa 1).

Aunque existe una variación considerable entre ubicaciones, se puede esperar que las concentraciones de contaminantes disminuyan con la altura lejos de las fuentes de contaminación en el suelo. Esta relación es más pronunciada en los sitios al borde de la vía con características significativas de fuente de emisión a nivel del suelo, condiciones climáticas y la geometría y el diseño de los edificios cercanos. Un estudio de 26 ubicaciones en el Reino Unido encontró que las concentraciones promedio de NO<sub>2</sub> en ubicaciones monitoreadas "al borde de la avenida" se redujeron con la altura en aproximadamente un 50% a 60% entre la planta baja y el cuarto piso. Por lo tanto, es probable que los monitores de contaminación en Bogotá subestimen la exposición a nivel del suelo porque con frecuencia se ubican en las azoteas.

<sup>4</sup> Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá <http://ambienteBogotá.gov.co/estaciones-rmcab> Consultado el 04/09/2021



**Figura 3. Altura de los monitores (metros) de las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) en comparación con la zona de respiración de una persona promedio. Los sitios al borde de la avenida se muestran en rojo, los sitios de fondo en azul y los sitios industriales en amarillo.**

## Conclusiones

Las concentraciones medias anuales medidas de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en Bogotá superan con frecuencia las pautas de la OMS. Esto es motivo de gran preocupación para la salud pública de la ciudad. Por el contrario, las concentraciones medias anuales de  $NO_2$  medidas en Bogotá rara vez superan las directrices nacionales o de la OMS. Los monitores de contaminación del aire en Bogotá suelen estar ubicados lejos de las avenidas principales y en lugares elevados. Existe evidencia significativa de que, en estos lugares, es probable que las concentraciones de contaminantes (especialmente de  $NO_2$ ) sean más bajas que en los lugares más cercanos a las principales fuentes de contaminación del tráfico, incluidas las ubicaciones de muchos hogares, colegios y negocios en Bogotá. Este informe presenta evidencia que sugiere que, en estos lugares, se pueden exceder las pautas nacionales y de la OMS sobre calidad del aire. Se considera que la ubicación de los monitores RMCAB no proporciona una ilustración adecuada de las concentraciones de contaminación, especialmente con respecto a la exposición de la población al  $NO_2$ .

## Referencias

- Air Quality Consultants. 2008. Concentraciones de  $NO_2$  y distancia de avenidas. Disponible en <https://www.agconsultants.co.uk/resources> (Consultado el 18 de abril de 2021)
- DEFRA 2021. Orientación técnica para el manejo local de la calidad del aire (TG16)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia [MADS] (2017). Resolución 2254 de 2017. Disponible en

<http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res%202254%20de%202017.pdf> (consulta el 10 de marzo de 2021).

- Mura, I., Franco, J.F., Bernal, L., Melo, N., Díaz, J.J. & Akhavan-Tabatabaei, R. Una década de la calidad del aire en Bogotá: un análisis descriptivo. Parte delantera. Reinar. Sa. 8, 65 (2020). DOI: 10.3389 / fenvs.2020.00065
- Pachón, Jorge E., et al. "Desarrollo y evaluación de un inventario integral de emisiones atmosféricas para la modelización de la calidad del aire en la megaciudad de Bogotá". Ambiente 9.2 (2018): 49.
- Sistema de Información Ambiental de Colombia [SIAC] (2018). Inventario de Emisiones En Colombia. Fuente IDEAM . Disponible: <http://www.siac.gov.co/emisionesaire> (Consultado el 18 de abril de 2021).
- WSP, Parson Brinkerhoff. 2017. Calidad del aire de la ciudad en altura: lecciones para desarrolladores y planificadores.