






Determinación de la concentración de cadmio contenido en material particulado menor a 10 micras en el municipio de Nobsa – Boyacá

Jonatan Sebastián Mateus Deaza¹ , Nidia Isabel Molina Gómez²  , Johan Alexander Álvarez Berrío³  

Recibido: 19 de Mayo del 2021 Aceptado: 12 de Agosto de 2021 Actualizado: 27 diciembre de 2021

DOI: 10.17151/luaz.2022.54.4

Resumen

El municipio de Nobsa se localiza en el Valle de Sogamoso, una de las zonas con mayor actividad industrial en Colombia debido a la presencia de diversos hornos de producción de cal, de polvo de ladrillo y cementeras. Entre los aspectos ambientales más significativos de este tipo de industrias se encuentran las emisiones atmosféricas que incluyen contaminantes como sulfatos, nitratos y metales pesados. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un monitoreo de material particulado inferior a 10 microgramos (PM₁₀) determinando las concentraciones de cadmio (Cd) presentes en este; dicho monitoreo se llevó a cabo en el municipio de Nobsa (Boyacá) durante 34 días en el punto de muestreo Estación de Bomberos y 36 días en el punto de muestreo Las Caleras. Las concentraciones de los contaminantes fueron determinadas a partir del método gravimétrico para PM₁₀ y el método de espectrofotometría de absorción atómica -horno de grafito para Cd. Con los datos obtenidos se ejecutó un modelo de dispersión y un modelo geoespacial a través de los Software Screen View 4.0 y Arcgis 10.5, lo que permitió evidenciar una elevada concentración de PM₁₀ con bajas trazas de Cd. Los resultados presentan una relación significativa entre las enfermedades respiratorias y la residencia mayor a un año en el municipio, lo que sugiere un efecto crónico sobre la población.

Palabras clave: efectos adversos, contaminación por metales, contaminantes atmosféricos, monitoreo ambiental, metales pesados.

Determination of the concentration of cadmium content in particulate material less than 10 microns in the municipality of Nobsa - Boyacá

Abstract

The municipality of Nobsa is located in the Sogamoso Valley, one of the areas with the greatest industrial activity in Colombia due to the presence of various kilns for the production of lime, brick dust and cement factories. Atmospheric emissions that include pollutants such as sulfates, nitrates and heavy metals are among the most significant environmental aspects of this type of industry. Taking the above into account, monitoring of particulate material of less than 10 micrograms (PM₁₀) was carried out, determining the concentrations of cadmium (Cd) present in it. This monitoring was carried out in the municipality of Nobsa (Boyacá) during 34 days at the Fire Station sampling point and during 36 days at Las Caleras sampling point. The concentration of the pollutants was determined from the gravimetric method for PM₁₀ and the atomic absorption spectrophotometry method-graphite furnace for Cd. With the data obtained, a dispersion model and a geospatial model

were executed through the Screen View Software 4.0 and Arcgis 10.5, which showed a high concentration of PM₁₀ with low traces of Cd. The results show a significant relationship between respiratory diseases (ER) and residence of more than one year in the municipality, which suggests a chronic effect on the population.

Key words: Adverse effects, heavy metal pollution, atmospheric pollutants, environmental monitoring, heavy metals.

Introducción

El incremento mundial de enfermedades respiratorias (ER) y de mortalidad prematura hace necesaria la investigación y determinación de posibles factores que influyen sobre este comportamiento (Li *et al.*, 2018). La calidad del aire es un factor determinante debido a su degradación y su relación directa con el sistema respiratorio y cardiovascular (Jo *et al.*, 2017).

Entre los principales contaminantes del aire se encuentra el material particulado (PM), el cual se cataloga actualmente como el mayor riesgo de salud ambiental en el mundo (Megido *et al.*, 2016), debido a su fácil ingreso a las vías respiratorias y la capacidad de generar un efecto biológico en el cuerpo dependiendo de su composición química (Song *et al.*, 2018). Las partículas entre 5 a 10 micras aproximadamente, se depositan en mayor medida en el árbol traqueo bronquial, mientras que las que poseen un diámetro de 1 a 5 micras se depositan en los bronquiolos y los alvéolos, generando una posible alteración en la función de intercambio de gases que realiza el pulmón (Kim *et al.*, 2015). Finalmente, las partículas menores a 2,5 micras se dirigirán al torrente sanguíneo (Song *et al.*, 2017).

La composición química del PM depende de sus orígenes, el porcentaje de elementos y sustancias químicas alojadas en este. Debido a que en una base más extensa las partículas más pequeñas poseerán una mayor superficie para su adsorción, la composición química dependerá estrictamente del tamaño de la partícula y el área de su superficie (Kelly *et al.*, 2012). Dentro de los componentes alojados en la superficie del PM se pueden encontrar residuos de reacciones fotoquímicas en la atmósfera (sulfatos, nitratos, oligoelementos) y fracciones carbonosas orgánicas e inorgánicas, a las cuales se pueden adherir metales de transición (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe), compuestos orgánicos y constituyentes biológicos originados por fuentes naturales o antropogénicas (Romanazzi *et al.*, 2014; Jia *et al.*, 2018).

Las trazas de cadmio (Cd) son relevantes dentro de los contenidos del PM₁₀, debido a sus variados efectos en la salud humana: disfunción renal, muerte celular en el hígado, disminución del funcionamiento de los pulmones y daño en las mitocondrias cerebrales que conlleva a las deficiencias motoras y de memoria (Álvarez, 2016; Shi *et al.*, 2016; Oh *et al.*, 2014), además de ser catalogado en 1993 por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer de la Organización Mundial de la Salud (OMS) como carcinógeno de clase I (Xu *et al.*, 2017; Choong *et al.*, 2014).

El monitoreo de PM₁₀ con diversos contenidos se ha realizado mediante técnicas como la microscopía óptica de luz reflejada y la fracción de ingesta de una población, en países como EE. UU y Australia (Koval *et al.*, 2018; Lamancusa *et al.*, 2017). De igual forma en Suramérica se ha realizado

monitoreo de PM₁₀ y Cd mediante equipos High-vol (Korc, 1999). Específicamente en Colombia se ha realizado un seguimiento del PM₁₀ en ciudades capitales; no obstante, solo se cuenta con planes de descontaminación atmosférica en la ciudad de Bogotá, los corredores industriales del Valle de Sogamoso y el Valle de Aburrá (Secretaría Distrital Ambiental, 2010; Fernández *et al.*, 2010).

El departamento de Boyacá ubicado en Colombia, en el sector conocido como el Valle de Sogamoso, es el tercer corredor industrial del país desde el 2005, debido a la alta presencia de industria pesada e industria artesanal (López, 2016). Dentro de los municipios ubicados en el corredor, Sogamoso cuenta con 403 hornos de ladrillo y el municipio de Nobsa cuenta con cerca de 178 hornos de producción de cal y procesa la piedra caliza para la fabricación de cemento (Corpoboyacá 2013; Muñoz *et al.*, 2016).

El desarrollo de la presente investigación tiene como objetivo determinar la concentración de cadmio contenido en material particulado menor a 10 micras y su asociación con enfermedades respiratorias en el municipio de Nobsa – Boyacá.

Materiales y métodos

Se determinaron las concentraciones de PM₁₀ y de Cd junto a su distribución espacio temporal en los periodos de julio a agosto y de septiembre a octubre de 2017. Posteriormente, se relacionaron las concentraciones diarias de los contaminantes con la presencia de ER identificadas según los registros individuales de prestación de servicios de salud (RIPS) y las concentraciones de los contaminantes en cada predio con la información recopilada mediante un instrumento de percepción en salud en Nobsa. Finalmente, mediante una regresión lineal múltiple se buscó establecer el grado de asociación estadística entre las concentraciones de PM₁₀, Cd y las ER identificadas en los dos casos.

Área de estudio

Nobsa se localiza en la provincia de Sogamoso, Colombia a 2550 m.s.n.m, sobre la Cordillera Oriental, específicamente entre las coordenadas 05°50' de latitud norte y 72°55' de longitud oeste (**Figura 1**). Presenta en su microclima una precipitación media de 780 mm/año, una temperatura media de 15,2 grados Celsius y una humedad relativa de 75% (Alcaldía de Nobsa, Boyacá, 2011).

Para el monitoreo, se ubicaron dos puntos de muestreo, el primero localizado en la zona urbana específicamente en la estación de bomberos (5°46'15.75"N 72°56'16.03"O), y el segundo en la vereda Las Caleras (5°45'10.10"N 72°56'28.15"O) la cual es caracterizada por la minería artesanal de piedra caliza. El primer punto de monitoreo se establece para modelar el comportamiento de los contaminantes en el área residencial urbana y el segundo para evidenciar el aporte de PM₁₀ y Cd por parte de las ladrilleras artesanales.

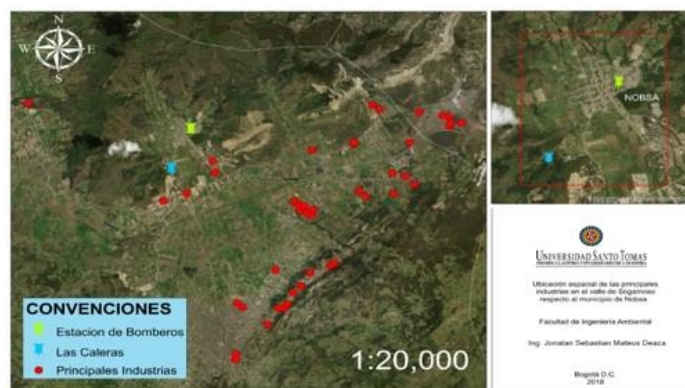


Figura 1. Valle de Sogamoso con sus principales industrias.
Fuente: los autores.

Identificación de la muestra

De acuerdo con las proyecciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) en 2017 Nobsa contaba con 6552 habitantes en la cabecera urbana (ESE Unidad de Salud de Nobsa, 2017), así mismo en promedio 5 personas habitan una vivienda (DANE, 2010). A partir de dicha información y junto con la cartografía catastral del municipio se estableció un total de 1311 predios de la cabecera urbana, para realizar el cálculo de la muestra.

En este orden de ideas, por medio del cálculo de muestras para poblaciones finitas se definió una muestra de 297 predios ([ecuación 1](#)), los cuales fueron seleccionados mediante un muestreo aleatorio simple (MAS) ([Tabla 1](#)) (Rodríguez *et al.*, 2016).

$$n = \frac{N Z^2 pq}{e^2(N-1) + Z^2 pq}$$

(Ecuación 1)

Variable	Significado	Valor
N	Población del municipio	1311
Z	Valor para un nivel de confianza del 95%	1,96
P	Proporción de la población con una característica en específico	50%
Q	Proporción de la población sin una característica en específico	50%
E	Error	5%
n	Muestra	297

Tabla 1. Variables utilizadas en el cálculo de la muestra para poblaciones finitas.
Fuente: los autores.

Diseño y aplicación de un instrumento de recolección de información

Se diseñó un instrumento para la determinación de la percepción en salud que fue aplicado en octubre de 2017, el cual estaba basado en la encuesta nacional de salud del Ministerio de Salud y Protección Social. El objetivo principal del instrumento era identificar la presencia de los casos de ER y cáncer con su respectiva ubicación dentro del municipio. Para visualizar otros posibles factores que tuvieran influencia sobre las ER, el instrumento tuvo en cuenta variables como género, edad, tiempo de residencia, presencia de fumadores en el hogar y condición socioeconómica.

Identificación de ER y casos de cáncer

Los casos de ER se identificaron mediante dos instrumentos los RIPS del municipio y el instrumento de recolección de información.

Recolección de muestras y preparación

El monitoreo fue realizado mediante un medidor de alto volumen conocido como High-vol TE-6000 Series el cual fue ubicado inicialmente en el punto de Las Caleras durante 36 días (julio a agosto de 2017) y en la estación de bomberos durante 34 días (septiembre a octubre de 2017). En el muestreo se utilizaron filtros de microfibra de cuarzo, los cuales fueron retirados diariamente y custodiados según la metodología IO-3.1 de la Environmental Protection Agency (EPA) (Environmental Protection Agency, 1999). Las muestras tomadas en el estudio presentan aproximadamente una duración de un mes para mantener una muestra representativa del estudio (Álvarez, 2016), sin embargo, el muestreo también se ve afectado por el presupuesto otorgado, así como, la disponibilidad de posicionamiento en los puntos de muestreo.

Junto a la recolección diaria de muestras se tuvo en cuenta las variables meteorológicas temperatura ambiente, precipitación, dirección y velocidad del viento, las cuales fueron registradas por una estación meteorológica portátil Davis Vantage Pro 2 Plus.

Determinación de la concentración de PM₁₀ y Cd

Teniendo como base el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad de aire del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT, 2008), los filtros fueron desecados durante 24 horas antes y después del muestreo. Adicionalmente fueron pesados antes y después de ser retirados del High-vol TE-6000 Series para determinar las concentraciones de PM₁₀ mediante el método gravimétrico. Finalmente, las muestras recolectadas se analizaron en el Laboratorio Instrumental de Alta Complejidad (LIAC) de la Universidad de La Salle.

Modelo de dispersión

El modelo de dispersión se desarrolló mediante el programa Screen View 4.0, el cual según Álvarez permite simular una inmisión como una emisión desde los puntos de muestreo (Álvarez, 2016). Los datos utilizados para el modelo fueron un factor de emisión calculado en función del promedio de la concentración de los contaminantes, la altura del muestreo, la velocidad del viento y la temperatura ambiente; posteriormente se establecieron las distancias en las que se determinarían las concentraciones de los contaminantes. Estas distancias fueron tomadas desde cada punto de

monitoreo hasta un punto central en cada polígono que representa los sectores catastrales del perímetro urbano del municipio.

Finalmente, mediante un modelo de pluma gaussiana, que incorpora factores relacionados a la fuente además de factores meteorológicos (Emissions, Monitoring, and Analysis Division, 2000), se calculó la concentración de PM_{10} y Cd junto a la estabilidad atmosférica en cada distancia estipulada.

Modelo geoespacial

Los resultados de velocidad y dirección de viento generados a partir de las rosas de viento junto con las concentraciones obtenidas en el modelo de dispersión para cada contaminante fueron ingresados al programa ArcGis10.5, para elaborar los mapas de dispersión de PM_{10} y Cd por medio de la herramienta de Kriging - Cokriging. Esta herramienta permite determinar la concentración de los contaminantes en cada zona del municipio partiendo de una interpolación y autocorrelación estadística entre las concentraciones determinadas en puntos específicos (Chica *et al.*, 2010).

Análisis de asociación

Se realizó una regresión lineal múltiple (RLM) con un nivel de confianza del 95% atendiendo a la posible relación estadística entre los casos de ER en la población de Nobsa con las concentraciones PM_{10} , Cd y el comportamiento de las variables meteorológicas. Adicionalmente, se hizo un segundo análisis contemplando la información recopilada con la encuesta con información como la residencia mayor a un año en la cabecera urbana, la presencia de fumadores activos, el régimen socioeconómico y el género masculino.

La RLM entre contaminantes, variables meteorológicas y casos de ER se realizó mediante el uso del software estadístico Statistical Package for the Social Sciences (SPSS.24).

Resultados

En la [Figura 2](#) se pueden evidenciar las elevadas concentraciones de PM_{10} en los dos puntos de muestreo, superando el límite máximo permisible (LMP) definido en la norma nacional de calidad del aire para el tiempo de exposición y el valor guía establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2005). Así mismo, se puede evidenciar que el percentil 25 de las dos estaciones sobrepasa el LMP.

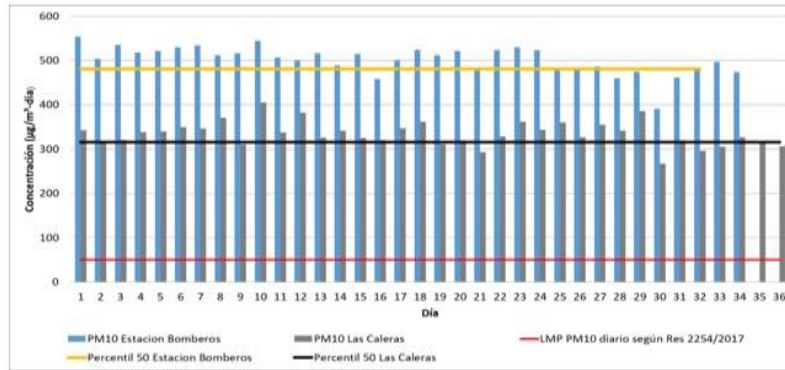


Figura 2. Comparación de las concentraciones de PM₁₀ diarias en Bomberos y Las Caleras con Niveles Límites Permisibles según la normativa nacional.

Fuente: los autores.

Para el caso del Cd y dado que la norma nacional solo estipula, para este contaminante, un LMP para un periodo anual, y no se existe un valor guía o límite para un periodo de exposición de 24 horas, se hizo uso de la norma anual como base de comparación. En la [Figura 3](#) se evidencia que ambos puntos de monitoreo cumplen con la norma de referencia.

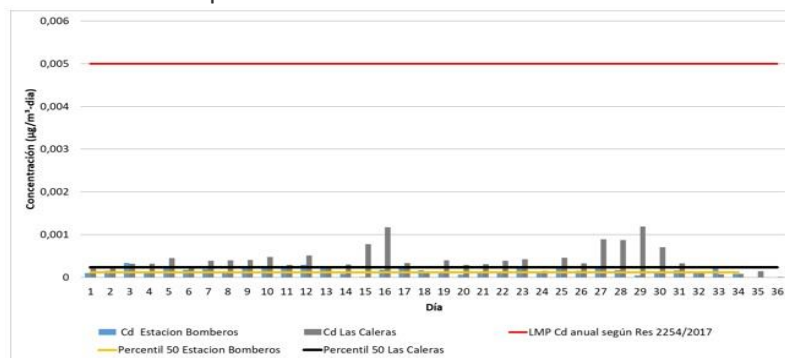


Figura 3. Comparación de las concentraciones de Cd anual en Bomberos y Las Caleras con Niveles Límites Permisibles según la normativa nacional.

Fuente: los autores.

Los comportamientos de PM₁₀ y Cd en ambos puntos de muestreo son similares. Según los resultados del modelo de Screen View presentados en la [Figura 4 y 5](#), se puede observar que en el punto de monitoreo de la estación de bomberos los dos contaminantes reducen su concentración a los 150 metros (m) de distancia, posteriormente se resuspenden y su concentración se incrementa llegando a los 20 µg/m³ para el PM₁₀ y a 5,5X10⁻⁶ µg/m³ para el Cd. Finalmente empiezan a disminuir nuevamente y sus trazas empiezan a desvanecerse totalmente después de los 600 m.

En el punto de monitoreo Las Caleras presentado en la [Figura 6 y 7](#), el modelo no presenta resuspensión; el PM₁₀ y el Cd, reducen sus trazas hasta disiparse a los 3100 m.

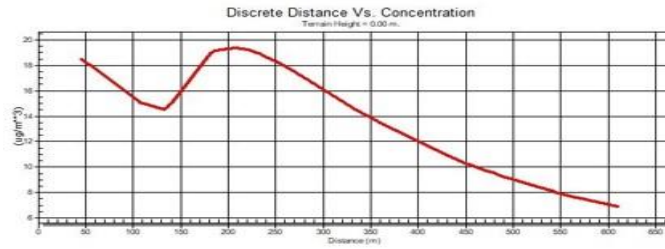


Figura 4. Dispersión de PM₁₀ desde la estación de Bomberos.

Fuente: los autores.



Figura 5. Dispersión de Cd desde la estación de bomberos.

Fuente: los autores.

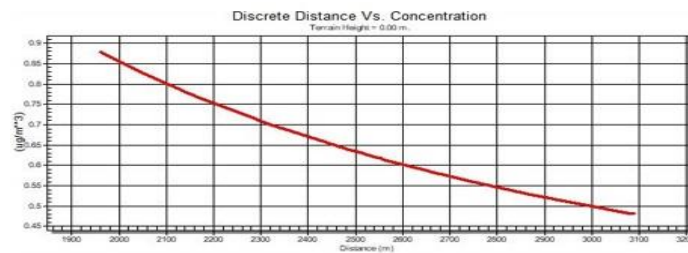


Figura 6. Dispersión de PM₁₀ desde las Caleras.

Fuente: los autores.

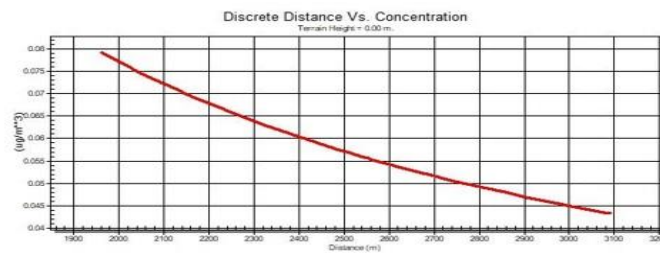


Figura 7. Dispersión de Cd desde las Caleras.

Fuente: los autores.

A partir de las condiciones de estabilidad atmosférica, dirección y velocidad de viento se determinaron las concentraciones de los contaminantes en cada uno de los polígonos previamente generados, simulando la dispersión de PM₁₀ y Cd desde la estación de bomberos.



Figura 8. Modelo geoespacial de PM₁₀ en el municipio de Nobsa desde la estación de bomberos.
Fuente: los autores.

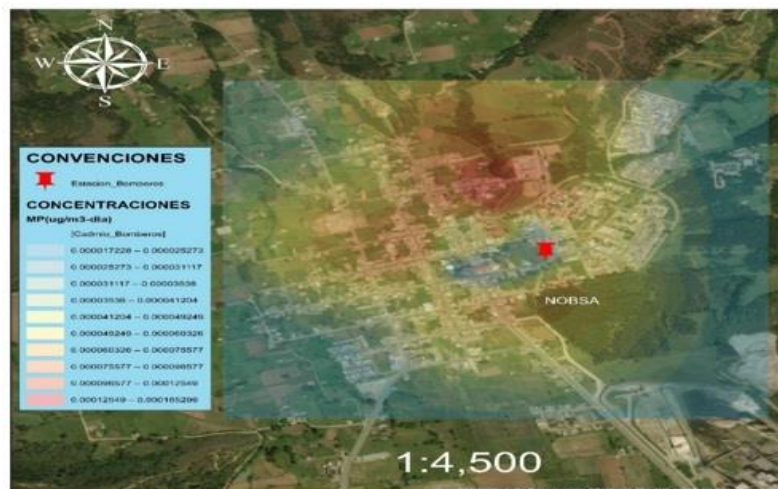


Figura 9. Modelo geoespacial de Cd en el municipio de Nobsa desde la estación de Bomberos.
Fuente: los autores.

La [Figura 8](#) presenta el modelo geoespacial de PM₁₀ realizado con base en los datos simulados del punto de monitoreo estación de bomberos, permite evidenciar elevadas concentraciones en todo el perímetro urbano, en particular hacia las zonas norte y oeste del municipio. Igualmente se puede observar un fenómeno de resuspensión en la zona central del municipio, la cual, presenta las concentraciones más elevadas del contaminante. En la [Figura 9](#) el Cd presenta un comportamiento similar al PM₁₀ pero se encuentra por debajo de los LMP.

De otro lado, en Las Caleras la simulación permite observar en la [Figura 10 y 11](#) que la zona con mayor concentración de PM₁₀ y Cd se encuentra ubicada al noroeste del municipio, coincidiendo geográficamente con las más altas concentraciones identificadas con la simulación realizada con los datos de la estación de bomberos.

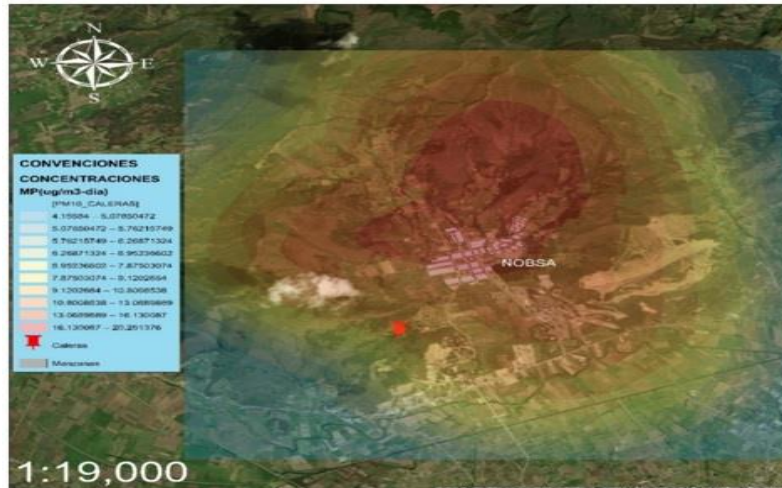


Figura 10. Modelo geoespacial de PM_{10} en el municipio de Nobsa desde Las Caleras.
Fuente: los autores.

La llanura rodeada por montañas, en la cual se ubica la cabecera municipal, permite confirmar la permanencia de los contaminantes en la zona, puesto que la orografía y la baja velocidad de los vientos impiden la dispersión de los contaminantes que llegan al municipio desde las direcciones sur este y sur oeste. La distribución espacial conglomerada para PM_{10} y Cd, en ambos puntos de monitoreo, muestra que las concentraciones se agrupan en puntos específicos del municipio ya sea en bajas o altas trazas.

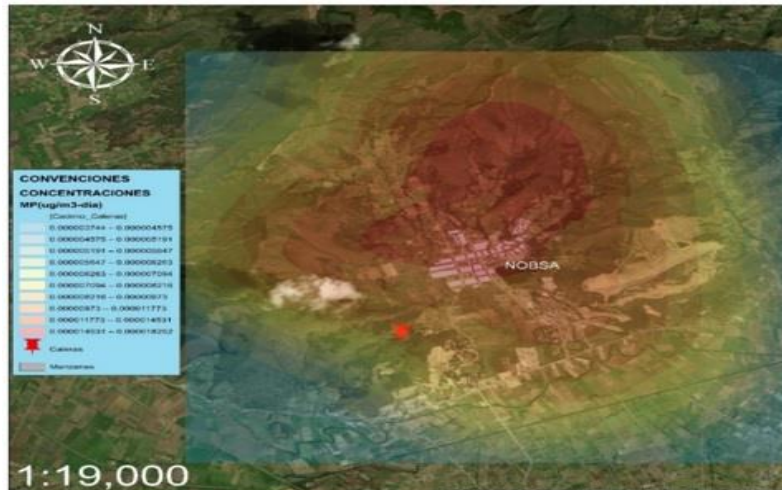


Figura 11. Modelo geoespacial de Cd en el municipio de Nobsa desde Las Caleras.
Fuente: los autores.

Descriptivos de información entre los contaminantes, las ER y la presencia de cáncer

En el periodo de muestreo de julio a agosto se identificaron 73 ER en los RIPS, de las cuales se destacan la rinofaringitis aguda (resfriado común) con un 24,6% de los casos, la bronquitis aguda con un 10,9% y la faringitis aguda con un 9,5%; mientras que de septiembre a octubre se

identificaron 54 ER, en donde la rinofaringitis aguda y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica presentan cada una 14,8% de los casos y la bronquitis aguda un 12,9%.

Por otra parte, de acuerdo con el instrumento aplicado se identificaron 103 ER diagnosticadas por personal médico (**Figura 12**) y 53 ER sin diagnóstico (**Figura 13**) (**Tablas 2 y 3**). El 33,9% del total de los casos de ER diagnosticados corresponden a grupos etarios sensibles como los son menores de 5 años que representan 11,3% del total de casos, mientras que los adultos mayores a 60 años poseen el 24,72% del total de casos.

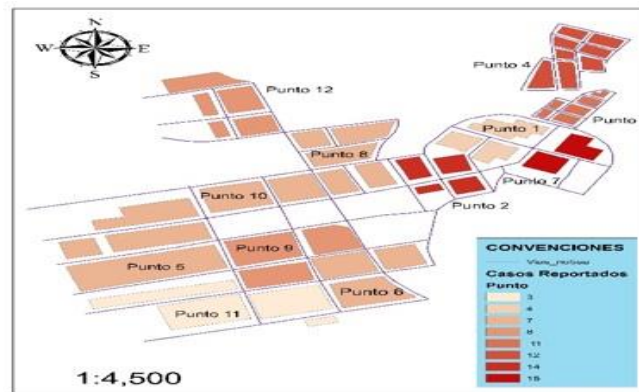


Figura 12. Número de personas que en el último año han sido diagnosticadas por un médico de algún tipo de infección respiratoria como: asma, neumonía, bronquitis crónica o alguna enfermedad grave de los pulmones.

Fuente: los autores.

Hacer click sobre la imagen para ampliarla

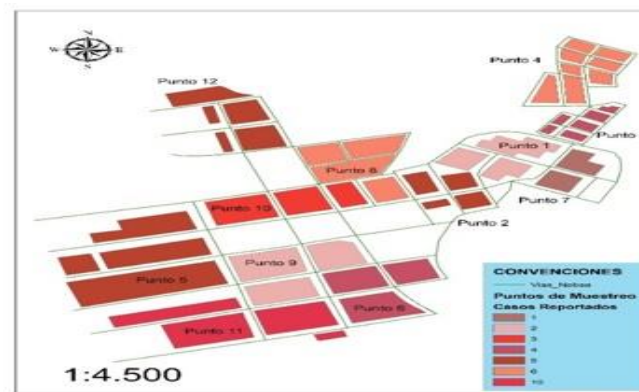


Figura 13. Número de personas que en el último año han tenido problemas pulmonares o infecciones respiratorias como: asma, neumonía, bronquitis crónica o alguna enfermedad grave de los pulmones.

Fuente: los autores.

Hacer click sobre la imagen para ampliarla

Manzana	Distancia a cada manzana (metros)	PM10 (μm^3)	Cd (μm^3)	Casos ER diagnosticados por consulta medica	Casos de cáncer	Número de unidades familiares con residencia mayor a 1 año	Número de personas fumadoras
1	170,5	408,12	0,000118	4	4	21	6
2	71	410,24	0,000119	14	5	23	7
3	342,5	340,38	0,000099	11	2	22	5
4	565,2	184,32	0,000053	12	0	23	5
5	490,5	221,69	0,000064	7	5	21	6
6	431,3	261,20	0,000076	7	3	20	6
7	220	469,96	0,000133	15	3	24	6
8	221,7	449,36	0,000130	7	3	22	12
9	270	418,48	0,000121	8	2	23	4
10	378,7	315,68	0,000092	7	2	22	1
11	569,5	181,40	0,000053	3	2	18	4
12	475	231,16	0,000067	8	0	21	2

Tabla 2. Casos ER identificados en las encuestas en relación con las concentraciones de PM₁₀ y Cd calculadas en cada manzana desde la estación de bomberos.

Fuente: los autores.

Manzana	Distancia a cada manzana (metros)	PM10 (μm^3)	Cd (μm^3)	Casos ER diagnosticados por consulta medica	Casos de cáncer	Número de unidades familiares con residencia mayor a 1 año	Número de personas fumadoras
1	2655	18,66	0,000055	4	4	21	6
2	2546,7	20,42	0,000018	14	5	23	7
3	2922,5	14,83	0,000013	11	2	22	5
4	3058	11,91	0,000011	12	0	23	5
5	2043,5	12,59	0,000011	7	5	21	6
6	2154,3	14,28	0,000013	7	3	20	6
7	2585	17,49	0,000016	15	3	18	4
8	2476,7	17,26	0,000016	7	3	22	12
9	2220	15,42	0,000014	8	2	23	4
10	2340	15,06	0,000014	7	2	22	1
11	1995	11,71	0,000011	3	2	24	6
12	2745	13,46	0,000012	8	0	21	2

Tabla 3. Casos ER identificados en las encuestas con relación a las concentraciones de PM₁₀ y Cd calculadas en cada manzana desde la estación de Caleras.

Fuente: los autores.

Igualmente, a partir de las encuestas se identificaron los casos de cáncer presentes en cada zona del perímetro urbano (**Figura 14**), los cuales se dividieron dependiendo del tipo de cáncer. De los 31 casos de cáncer diagnosticados, el 22,5% corresponde a cáncer de pulmón, el 19,35% a cáncer de hígado, el 19,35% a leucemia y el porcentaje faltante se asocia a otros tipos de cáncer.

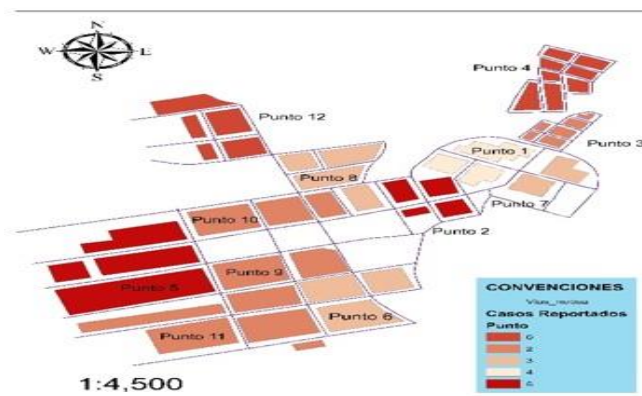


Figura 14. Personas diagnosticadas por un médico por algún tipo de cáncer.

Fuente: los autores.

Hacer click sobre la imagen para ampliarla

Regresión estadística de ER, contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas

La regresión estadística realizada para los periodos de julio a agosto y septiembre a octubre establece que las ER identificadas en los RIPS no es una variable dependiente de la concentración de PM₁₀, la concentración de Cd y las variables meteorológicas. De igual forma para esta regresión estadística se rechaza la hipótesis alternativa y se aprueba la hipótesis nula, la cual propone que las ER presentes en el municipio no se ven influenciadas por las concentraciones del contaminante, ni por las variables meteorológicas (Tablas 4 y 5).

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	6,201	4	1,550	,962	,443 ^b

a. Variable dependiente: ER

b. Predictores: (Constante), Precipitación, Temperatura, PM10, Cd

	PM10	Cd	Temperatura	Precipitación
Sig.	,975	,624	,736	,062

a. Variable dependiente: ER

Tabla 4. Significancia de la regresión entre las ER identificadas en los RIPS y las concentraciones de los contaminantes además de variables meteorológicas en el periodo de julio a agosto.

Fuente: los autores.

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	6,062	4	1,515	,513	,727 ^b

a. Variable dependiente: ER

b. Predictores: (Constante), Precipitación, PM10, Cd, Temperatura

	PM10	Cd	Temperatura	Precipitación
Sig.	,626	,726	,231	,665

a. Variable dependiente: ER

Tabla 5. Significancia de la regresión entre las ER identificadas en los RIPS y las concentraciones de los contaminantes además de variables meteorológicas en el periodo de septiembre a octubre.

Fuente: los autores.

Regresión estadística de ER, contaminantes atmosféricos, tiempo de residencia y distancia al punto de monitoreo

La regresión estadística realizada, teniendo en cuenta la distancia al punto de monitoreo estación de bomberos, estableció que las ER identificadas en la encuesta poseen una relación directamente proporcional con la concentración de PM₁₀, la concentración de Cd, la residencia mayor a un año en el municipio y las personas fumadoras. Cabe añadir, que la hipótesis alternativa solo se aprobó para las variables de residencia mayor a 1 año, presencia de fumadores y género masculino (Tabla 6).

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	122,908	6	20,485	4,435	,062 ^b

a. Variable dependiente: ER

b. Predictores: (Constante), Regimen_Contributivo, PM10, Genero_Masculino, Fumadores, Res.mayora1año, Regimen_Subsidiario

	PM10	Res. mayor a 1 año	Fumadores	Genero_Masculino	Regimen_Subsidiario	Regimen_Contributivo
Sig.	,123	,022	,018	,041	,081	,058

a. Variable dependiente: ER

Tabla 6. Significancia de la regresión entre las ER identificadas en la encuesta y la concentración de contaminantes determinadas desde la estación de bomberos además de variables de relevancia identificadas en la encuesta.

Fuente: los autores

Para esta regresión, la hipótesis alternativa solo se aprueba para la variable de presencia de fumadores (Tabla 7).

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	126,002	7	18,000	3,600	,117 ^b

a. Variable dependiente: ER

b. Predictores: (Constante), Regimen_Contributivo, PM10, Genero_Masculino, Fumadores, Residencia, Cd, Regimen_Subsidiario

	PM10	Cd	Residencia	Fumadores	Genero_Masculino	Regimen_Subsidiario	Regimen_Contributivo
Sig.	,589	,475	,582	,044	,060	,089	,073

a. Variable dependiente: ER

Tabla 7. Significancia de la regresión entre las ER identificadas en la encuesta y la concentración de contaminantes determinadas desde las Caleras, además de variables de relevancia identificadas en la encuesta.

Fuente: los autores.

Regresión estadística de casos de cáncer, contaminantes atmosféricos, tiempo de residencia y distancia al punto de monitoreo

La regresión estadística realizada teniendo en cuenta la distancia al punto de monitoreo estación de bomberos estableció que los casos de cáncer identificados en la encuesta presentan una relación directamente proporcional con la concentración de PM₁₀, la concentración de Cd, la residencia mayor a un año en el municipio y las personas fumadoras (Tabla 8). No obstante, se rechaza la hipótesis alternativa y se aprueba la hipótesis nula, la cual establece que los casos de cáncer no tienen asociación con las variables analizadas.

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	15,452	6	2,575	,956	,530 ^b

a. Variable dependiente: Cancer

b. Predictores: (Constante), Regimen_Contributivo, PM10, Genero_Masculino, Fumadores, Res.mayorataño, Regimen_Subsidiario

	PM10	Res. mayorataño	Fumadores	Genero_Masculino	Regimen_Subsidiario	Regimen_Contributivo
Sig.	,488	,756	,373	,583	,557	,604

a. Variable dependiente: Cancer

Tabla 8. Significancia de la regresión entre los casos de cáncer identificadas en la encuesta y la concentración de contaminantes determinadas desde la estación de bomberos además de variables de relevancia identificadas en la encuesta.

Fuente: los autores.

Discusión

Nobsa cuenta con cerca de 178 hornos de producción de cal en donde se procesa la piedra caliza para la fabricación de cemento (Corpoboyacá 2013; Muñoz *et al.*, 2016), además se localiza industria cementera y siderúrgica. Según Khaniabadi, Jia y Godoi, fuentes de emisión como las descritas tienen grandes aportes de PM10. (Khaniabadi *et al.*, 2018; Jia *et al.*, 2018, Godoi *et al.*, 2008). Por otra parte, teniendo en cuenta que el Valle de Sogamoso es el tercer corredor industrial del país, el tráfico de vehículos de carga tales como tractomulas y camiones son constante, por lo tanto el aporte de estas fuentes móviles a la emisión de PM10 resulta significativo (Forero y Mayra, 2008).

En la [figura 10](#) se evidencia un aporte entre 16 a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁₀ en el perímetro urbano de Nobsa proveniente de la zona sureste donde se encontraba ubicado el punto de medición Las Caleras. Como se ha mencionado este lugar se caracteriza por alta presencia de hornos de producción de cal, lo cual implica mayores aportes de PM₁₀. Se resalta que el resto del municipio se encuentra rodeado por la cordillera oriental, por lo tanto los aportes del contaminante pueden concentrarse en el perímetro urbano y no dispersarse con facilidad.

Esto puede constatarse en el proceso de resuspensión que se presenta en el centro de Nobsa evidenciado en la [figura 8 y 9](#), es decir, el PM₁₀ y el Cd allí contenido se puede resuspender por causa del transporte de carga y particular; se observa la reducción de este fenómeno con la distancia al centro urbano. Las elevadas concentraciones de PM₁₀, se constatan en estudios realizados en las ciudades de Medellín, Bogotá y Sogamoso donde ha sobrepasado la normativa de nacional y la internacional en diversas ocasiones, por el contrario las concentraciones de Cd han permanecido dentro de la normativa (Pachón y Sarmiento, 2008; Universidad Nacional de Colombia, 2016).

Por otra parte, las trazas de Cd contenidas en el PM₁₀ son mínimas y se encuentran por debajo de lo estipulado por la normativa, aun así, debido a una exposición crónica se pueden presentar enfermedades asociadas al metal como: cáncer de pulmón y cáncer de hígado (Ostadrhimi *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018). No obstante, el PM10 además del cadmio puede contener otros contaminantes tales como sulfatos, nitratos, metales de transición (Pb, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe) o

compuestos orgánicos volátiles e hidrocarburos policíclicos aromáticos, entre otros. Estos se consideran factores causales de interés en la manifestación de los síntomas de una enfermedad.

Es posible que el municipio presente una exposición crónica en la cual la variable de mayor importancia no es la concentración de los contaminantes sino el tiempo de exposición de la población al metal. Entre otros factores, una exposición crónica al Cd implica que algunas células no son capaces de adaptarse y obtienen características cancerígenas (Person *et al.*, 2013).

Es probable que la exposición a un agente tóxico durante un día no genere un efecto agudo; se requiere de un periodo de acumulación entre 2 a 5 semanas, dependiendo del comportamiento del agente dentro del organismo (Reyna *et al.*, 2015). Esto explica los resultados generados en la regresión lineal múltiple en función del periodo de muestreo, en donde las ER presentes durante los días de muestreo no se asociaron con las concentraciones diarias de los contaminantes, lo mismo sucede en el análisis realizado para la distancia al punto de monitoreo.

No obstante, en el análisis que incluyó el tiempo de residencia se encontró que posiblemente existe un efecto crónico sobre la población debido a la presencia de diversos contaminantes atmosféricos a través de los años en el municipio.

Por último, hay que tener en cuenta que el valle de Sogamoso cuenta con un plan de reconversión tecnológica en el sector productivo artesanal de los hornos de producción de polvo ladrillo y cal, el cual busca que los hornos usen combustible de coque y construyan chimeneas que permitan dispersar los gases (Muñoz *et al.*, 2016). Estas estrategias han permitido la reducción de diversos contaminantes, pero no han logrado que el PM₁₀ presente en el municipio, se encuentre dentro de los límites máximos permisibles estipulados en la normativa nacional.

Conclusiones

Aunque el Valle de Sogamoso cuenta con un plan de descontaminación atmosférica, las concentraciones de PM₁₀ determinadas durante el muestreo incumplen con la normativa nacional vigente; por lo cual es necesario el desarrollo de estrategias que incluyan las condiciones específicas de cada municipio perteneciente al corredor industrial del Valle de Sogamoso.

Se ha demostrado que una exposición crónica al Cd puede generar un efecto tóxico en los seres vivos, por lo tanto, aunque las concentraciones monitoreadas en Nobsa, cumplen con la normativa nacional vigente, es necesario su continuo monitoreo ya que pueden tener una incidencia en la salud de la población.

El confinamiento de Nobsa debido a la cordillera Oriental y la baja dispersión de los contaminantes implica la resuspensión del PM₁₀ en la atmósfera, por lo cual, el fenómeno de dispersión dependerá del tiempo que puede permanecer en la atmósfera más que de la distancia que este recorre.

Agradecimientos

A la ingeniera Mariana Flórez por su trabajo en campo y su recolección de datos los puntos de muestreo.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan que no existe ningún conflicto de intereses para la publicación de este artículo.

Fuentes de financiación

Esta investigación fue financiada por el proyecto FODEIN 2017, el cual se encontraba vinculado con la Universidad Santo Tomas.

Referencias

- Alcaldía de Nobsa - Boyacá. (2011). Documento síntesis- plan de ordenamiento territorial Nobsa. <https://bit.ly/42Z91xE>
- Álvarez, J. A. (2016). *Modelo para la evaluación de la concentración de plomo, cadmio y cromo contenidos en material particulado respirable en la localidad Los Mártires, Bogotá D.C.* <http://www.bdigital.unal.edu.co/51459/>
- Corpoboyacá. (2013). *Resolución 0618 del 2013*. <https://bit.ly/3BlrlzJ>
- Chica Olmo, J., Chica Olmo, M. y Cano Cuervo, R. (2010). Comparison of kriging, co-kriging and hedonic regression to estimate housing price. *Congreso Internacional de Catastro Unificado y Multipropósito*. Universidad de JAÉN.
- Choong, G., Liu, Y. & Templeton, D. M. (2014). Interplay of calcium and cadmium in mediating cadmium toxicity. *Chemico-Biological Interactions*, 211, 54-65. doi: 10.1016/j.cbi.2014.01.007
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2010). *Perfil municipal Nobsa*.
- Emissions, Monitoring, and Analysis Division. (2000). *Guía del usuario del modelo, SCREEN3*. <https://www3.epa.gov/ttnecatc1/dir2/scrn3ds.pdf>
- Environmental Protection Agency. (1999). Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air, June 1999. NASA/Langley Research Center.
- ESE Unidad de Salud Nobsa. (2017). Análisis de situación de salud con el modelo de los determinantes sociales de salud, municipio de Nobsa Boyacá 2017. <https://bit.ly/3uuBP1t>

- Fernández-Gómez, M., Serna Patiño, J., Ramírez Casas, G. E., Toro Gómez, M. V., y Molina Vásquez, E. (2010). Plan de descontaminación del aire en la región metropolitana del Valle de Aburrá. *Producción + Limpia*, 5(1), 10-26. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=3991406>
- Forero González, D. C. y Mayra Constanza, D. H. (2008). *Análisis comparativo de la concentración de carbono orgánico (OC), carbono elemental (EC) contenido en el material particulado menor a 10 micrómetros (PM10) entre las áreas metropolitanas de Cali y Valle de Aburrá, el distrito de Barranquilla y las ciudades de Bucaramanga, Nobsa (valle de Sogamoso) y Pereira; y algunas ciudades de Latinoamérica; estimación de las fuentes de emisión en el área metropolitana del Valle de Aburrá*. <http://hdl.handle.net/10185/14965>
- Godoi, R. H. M., Godoi, A. F. L., Braga, D. M., Makarovska, Y., Alföldy, B., Carvalho Filho, M. A. S. & Van Grieken, R. (2008). Inhaled particulate matter from lime industries: Chemical composition and deposition in human respiratory tract. *Atmospheric Environment*, 42(30), 7027-7033. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.07.002
- Jia, J., Cheng, S., Yao, S., Xu, T., Zhang, T., Ma, Y. & Duan, W. (2018). Emission characteristics and chemical components of size-segregated particulate matter in iron and steel industry. *Atmospheric Environment*, 182, 115-127. doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.03.051
- Jo, E., Lee, W., Jo, H., Kim, C., E2om, J., Mok, J., Kim, M., Lee, K., Kim, K., Lee, M. & Park, H. (2017). Effects of particulate matter on respiratory disease and the impact of meteorological factors in Busan, Korea. *Respiratory Medicine*, 124, 79-87. doi: 10.1016/j.rmed.2017.02.010
- Kelly, F. J. & Fussell, J. C. (2012). Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. *Atmospheric Environment*, 60, 504-526. doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.06.039
- Kim, K., Kabir, E. & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, 136-143. doi: 10.1016/j.envint.2014.10.005
- Korc E., M. (1999). *Monitoreo de la calidad del aire en América Latina*. <https://bit.ly/3uLV9Y2>
- Koval, S., Krahenbuhl, G., Warren, K., y O'Brien, G. (2018). Optical microscopy as a new approach for characterising dust particulates in urban environment. *Journal of Environmental Management*, 223, 196-202. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.06.038
- Khaniabadi, Y. O., Sicard, P., Taiwo, A. M., De Marco, A., Esmaeili, S. & Rashidi, R. (2018). Modeling of particulate matter dispersion from a cement plant: Upwind-downwind case study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 3104-3110. doi: 10.1016/j.jece.2018.04.022
- Lamancusa, C., Parvez, F. & Wagstrom, K. (2017). Spatially resolved intake fraction estimates for primary and secondary particulate matter in the United States. *Atmospheric Environment*, 150, 229-237. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.11.010

- Li, J., Chen, B., Sánchez, A. M., Alastuey, A., Querol, X., y de la Rosa, J. D. (2018). 2005–2014 trends of PM10 source contributions in an industrialized area of southern Spain. *Environmental Pollution*, 236, 570-579. doi: 10.1016/j.envpol.2018.01.101
- Lopez Dulcey, J. R. (2016). Plan de acción 2016-2019. <https://bit.ly/3opElBa>
- MAVDT-Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. <https://bit.ly/3uvf9OH>
- Megido, L., Suárez-Peña, B., Negral, L., Castrillón, L., Suárez, S., Fernández-Nava, Y. y Marañón, E. (2016). Relationship between physico-chemical characteristics and potential toxicity of PM10. *Chemosphere*, 162, 73-79. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.07.067
- Muñoz Luque, A. (2016). Influencia alemana en la industria de Boyacá [Colombia]. *Labor & Engenho*, 10(2), 191-198. doi: 10.20396/lobore.v10i2.8646189
- Oh, I., Oh, C., Lee, J., Park, Y. H., Choe, B., Yoon, T. & Choi, J. (2014). Blood cadmium levels are associated with a decline in lung function in males. *Environmental Research*, 132, 119-125. doi: 10.1016/j.envres.2014.04.008
- OMS - Organización Mundial de la Salud. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*.
- Ostadrahimi, A., Payahoo, L., Somi, M. H., Hashemzade, S. H., Esfahani, A., Asgharijafarabadi, M. & KhajeBishak, Y. (2017). The association between blood cadmium levels and the risk of gastrointestinal cancer in Tabriz, northwest of Iran. *Polish Annals of Medicine*, 24(2), 133-137. doi: 10.1016/j.poamed.2016.05.004
- Pachón, J. E., y Sarmiento Vela, H. (2008). Análisis espacio-temporal de la concentración de metales pesados en la localidad de Puente Aranda de Bogotá-Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (43), 120-133. <https://bit.ly/3UE4snm>
- Person, R. J., Tokar, E. J., Xu, Y., Orihuela, R., Ngalame, N. N. O. & Waalkes, M. P. (2013). Chronic cadmium exposure in vitro induces cancer cell characteristics in human lung cells. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 273(2), 281-288. doi: 10.1016/j.taap.2013.06.013
- Reyna, M., Quintero, M. y Vildosola, R. (2015) Análisis de la relación del PM10 con las enfermedades respiratorias en la población urbana de Mexicali, Baja California: un estudio de series de tiempo. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 14, 116-125.
- Rodríguez Franco, J., Pierdant Rodríguez, A. y Rodríguez Jiménez, E. C. (2016). Muestreo y distribuciones muestrales. In J. E. Callejas (Ed.), *Estadística para administración*, 245-272.

- Romanazzi, V., Casazza, M., Malandrino, M., Maurino, V., Piano, A., Schilirò, T. y Gilli, G. (2014). PM10 size distribution of metals and environmental-sanitary risk analysis in the city of Torino. *Chemosphere*, 112, 210-216. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.04.034
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2010). Plan decenal de descontaminación del aire para Bogotá. <https://bit.ly/3pXA1yN>
- Shi, Z., Taylor, A., Riley, M., Byles, J., Liu, J., y Noakes, M. (2016). Association between dietary patterns, cadmium intake and chronic kidney disease among adults. *Clinical Nutrition*, 37(1), 276-284. doi: 10.1016/j.clnu.2016.12.025
- Song, J., Zheng, L., Lu, M., Gui, L., Xu, D., Wu, W. & Liu, Y. (2018). Acute effects of ambient particulate matter pollution on hospital admissions for mental and behavioral disorders: A time-series study in Shijiazhuang, China. *Science of the Total Environment*, 636, 205-211. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.187
- Song, Y., Wang, X., Maher, B. A., Li, F., Xu, C., Liu, X., . . . Zhang, Z. (2017). Reprint of: The spatial-temporal characteristics and health impacts of ambient fine particulate matter in China. *Journal of Cleaner Production*, 163, S35-S358. doi:10.1016/j.jclepro.2017.05.145
- Universidad Nacional de Colombia, informe N°21 del Convenio 326 de 2016. (2016). *Estado de la calidad de aire, universidad Nacional de Colombia Sede Medellín*. <https://search.proquest.com/docview/2012601140>
- Wang, L., Wang, Y., Mandal, A. K., Son, Y., Pratheeshkumar, P., Wise, J. T. F. & Chen, Z. (2018). Roles of ROS, Nrf2, and autophagy in cadmium-carcinogenesis and its prevention by sulforaphane. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 353, 23-30. doi: 10.1016/j.taap.2018.06.003
- Xu, M., Wang, P., Sun, Y., Yang, L. & Wu, Y. (2017). Joint toxicity of chlorpyrifos and cadmium on the oxidative stress and mitochondrial damage in neuronal cells. *Food and Chemical Toxicology*, 103, 246-252. doi: 10.1016/j.fct.2017.03.013
- Zang, Y., Devleeschauwer, B., Bolger, P. M., Goodman, E. & Gibb, H. J. (2019). Global burden of late-stage chronic kidney disease resulting from dietary exposure to cadmium, 2015. *Environmental Research*, 169, 72-78. doi: 10.1016/j.envres.2018.10.005

1 Ingeniero Ambiental Universidad Santo Tomas de Bogotá D.C., Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-3866-7559> jonatanmateusd@usantotomas.edu.co

2 Ingeniera Ambiental y Sanitaria, Especialista en higiene y salud ocupacional, Magíster en Administración. Facultad de Ingeniería Ambiental Universidad Santo Tomás Bogotá D.C., Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-4485-262X> nidiamolina@usantotomas.edu.co

3 Ingeniero Ambiental y Sanitario, Magíster en Toxicología, Grupo de investigación INAM USTA. Facultad de Ingeniería Ambiental Universidad Santo Tomás Bogotá D.C., Colombia. orcid.org/0000-0001-7805-7128 johanalvarezb@usantotomas.edu.co

Para citar este artículo: Mateus Deaza, J. S., Molina Gómez, N. I. y Álvarez Berrio, J. A. (2022). Determinación de la concentración de cadmio contenido en material particulado menor a 10 micras en el municipio de Nobsa – Boyacá. *Revista Luna Azul* (On Line), 54, 61-81. <https://doi.org/10.17151/luaz.2022.54.4>

Esta obra está bajo una [Licencia de Creative Commons Reconocimiento CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Código QR del artículo

