



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL FACTOR DE AUMENTO MAGNÉTICO EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ (AMVA), COLOMBIA

Alexander Sánchez-Duque^{1,a,*}, Francisco Bautista¹, Avto Goguitchaichvili², Rubén Cejudo²

¹ Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental LUGA, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental CIGA, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, México.

² Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental LUGA, Instituto de Geofísica Unidad Michoacán IGUM, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, México.

^a Ahora en: Tecnológico Nacional de México / I.T. Valle de Morelia, Morelia, México.

*e-mail: asanchezduq@gmail.com

ABSTRACT

Urban dust offers information on short-term or temporary pollution, accumulated in time intervals that occur during the rainy seasons or high winds, which can vary from a few weeks to several months. A detailed study of environmental magnetism was carried out with the objective of revealing the spatial variation of pollution in the city of Medellín that belongs to the AMVA (Colombia). To achieve this objective, a systematic sampling of urban dust was designed in the main avenues of the city. It is observed that the spatial distribution of the relative concentration of ferrimagnetic minerals is high to extreme in most of the conurbation.

Keywords: Environmental Magnetism, SIRM, Urban Dust, Geostatistics, Medellín.

RESUMEN

El polvo urbano ofrece información de la contaminación a corto plazo o temporal, acumulada en intervalos de tiempo que se presentan en el intermedio de las épocas de lluvias o de vientos fuertes, que pueden variar desde algunas semanas a varios meses. En el marco de este trabajo, se efectuó un estudio de magnetismo ambiental con el objetivo de delinear la variación espacial de la contaminación en la ciudad de Medellín que pertenece al AMVA. Para lograr este objetivo, se diseñó un muestreo sistemático de polvo urbano en las principales avenidas de la ciudad. Se observa que la distribución espacial de la concentración relativa de minerales ferrimagnéticos es de alta a extrema en la mayor parte de la conurbación.

Palabras Clave: Magnetismo Ambiental, MRIS, Polvo Urbano, Geoestadística, Medellín.

1. Introducción

Las ciudades son importantes impulsores del desarrollo de las naciones, concentran gran parte de la población, la actividad económica, política, social y cultural. En las últimas siete décadas el planeta ha experimentado un crecimiento vertiginoso de la población urbana, pasando del 30 % en 1950 al 54 % en 2014, sobresaliendo Norte América (82 %) y Latino América y el Caribe (80 %) como las regiones más urbanizadas del planeta en el año 2014 (DESA, 2014). Desafortunadamente es común que el crecimiento de las zonas urbanas se vea acompañado de un incremento de la contaminación y la degradación ambiental.

El AMVA es una entidad administrativa que asocia a los 10 municipios del Valle de Aburrá. Se extiende longitudinalmente sobre el eje natural del río Medellín en una topografía irregular y pendiente, entre 1300 y 2800 m.s.n.m. Las áreas urbanas de siete de esos municipios forman una ciudad conurbada, la segunda en importancia en Colombia. Tiene una superficie de 1165.5 km², 3,726,219 habitantes, densidad de 3197 habitantes/km² (DANE, 2019).

Las tendencias para el período 2007-2010 de las concentraciones de contaminantes del aire en Colombia (IDEAM, 2012), confirmaron que el AMVA tiene problemas de contaminación del aire según los valores de los parámetros de calidad del aire PM₁₀ y PM_{2.5}. El inventario de emisiones atmosféricas para el AMVA del



año 2015 (AMVA y UPB 2017), confirmó que el 79 % del material particulado inferior 2.5 micras ($PM_{2.5}$) fue emitido por el parque automotor.

Para determinar la existencia de concentraciones de contaminantes en el ambiente urbano, y establecer si su origen es natural o antrópico, se debe medir el agente contaminante de interés. Una investigación sistemática del ambiente requiere que el contaminante de interés sea monitoreado con suficiente densidad de muestreo, temporal y espacial, para que se pueda realizar una evaluación realista de las variaciones y tendencias (Harrison, 2006). En este trabajo se analizó el polvo urbano (PU) y a través de este conocer la variación espacial de la concentración relativa de minerales magnéticos en el AMVA, nuestros agentes contaminantes de interés. Una porción del PU corresponde a partículas sólidas que pueden ser resuspendidas reiteradamente en el aire por la acción de corrientes de viento naturales o inducidas por el tráfico vehicular (Amato *et al.*, 2013); algunas de estas partículas resuspendidas tienen diámetros inferiores a $10 \mu m$ (Jancsek-Turóczy *et al.*, 2013) por lo que podrían ser inhaladas fácilmente o ingresar al cuerpo humano a través del tracto digestivo por ingestión accidental y tener implicaciones a mediano y largo plazo en la salud de los ciudadanos.

2. Metodología

Se recolectaron 99 muestras de PU depositado sobre las vialidades en enero de 2014 en la ciudad conurbada. Se trató de un diseño de muestreo sistemático, con una distancia media de separación entre sitios de muestreo de 1 ± 0.5 km. Se obtuvo información relevante de cada sitio de muestreo: georreferenciación; unidad geológica superficial general (Consortio Microzonificación 2006, 2006) (Qa, Depósitos Aluviales; Qdv, Depósitos de Vertiente; KdA, Stock de Altavista; KgSD, Stock de San Diego; JKmbP, Metabasitas del Picacho; JKuM, Dunitas de Medellín; Jml, Milonita de la Iguaná; TRMPP, Migmatitas de Puente Peláez).

Cada muestra fue tamizada con malla plástica (aberturas de 1 mm). Luego se encapsuló una submuestra en un contenedor cúbico de acrílico de volumen interno de 8 cm^3 y se indujo una magnetización remanente isotérmica (MRI) con aplicación de pulsos magnéticos unidireccionales de intensidad creciente hasta 0.7 T, empleando un magnetizador de pulsos ASC IM10-30. La MRI inducida por cada pulso fue determinada con un magnetómetro de giro Molspin LTD. Los resultados del pulso a 0.7 T fueron tomados como la MRIS (MRI a saturación).

Se calculó el factor de aumento magnético (FAM) con los valores obtenidos para la MRIS, adecuando el factor de contaminación utilizado por Tomlinson *et al.* (1980) con la expresión,

$$FAM_i = \frac{MRIS_i}{MRIS_{vf}}$$

donde: FAM_i , FAM de la *i*-ésima submuestra; $MRIS_i$, MRIS del *i*-ésima submuestra; $MRIS_{vf}$, valor de fondo para la MRIS según la unidad geológica superficial del sitio de muestreo.

Los valores de fondo se tomaron de muestras de suelos urbanos superficiales recolectadas en el mismo sitio de muestreo del PU, que fueron clasificadas según la unidad geológica superficial a la que pertenecen. Una fracción del PU corresponde a partículas de suelo y/o rocas meteorizadas transportadas por el viento y agua. La finalidad de usar valores de fondo del suelo urbano fue normalizar la componente de origen litogénico para realzar la componente de origen antropogénico del PU.

Para evaluar los valores del FAM obtenidos, se adaptaron los intervalos de clasificación del factor de contaminación propuestos por Hakanson (1980), quedando así: $FAM < 1$, sin aumento magnético; $1 \leq FAM < 3$, bajo; $3 \leq FAM < 6$, medio; $6 \leq FAM < 9$, alto; $9 \leq FAM < 12$, muy alto; $FAM \geq 12$, extremo.

El análisis espacial del FAM siguió los criterios recomendados por Oliver y Webster (2015), de la siguiente forma: a) análisis exploratorio de los datos, para encontrar errores en coordenadas, tendencias de los datos,



transformación de datos para buscar normalidad, etc.; b) análisis estructural, para verificar la existencia o no de correlación espacial a través del variograma experimental y la determinación del modelo teórico de mejor ajuste; c) interpolación, usando kriging ordinario puntual y confirmando su confiabilidad con validación cruzada. Finalmente se obtuvo la representación cartográfica.

3. Resultados

Los valores de fondo ($MRIS_{vf}$, en unidades de mAm^2kg^{-1}), provenientes de suelos urbanos superficiales fueron: 1.63 para Qa; 1.42 para Qdv; 4.29 para KdA; 1.65 para KgSD; 4.32 para JKmbP; 11.18 para JKuM; 1.61 para Jml; 2.72 para TRmPP.

La Tabla 1 presenta el resumen estadístico de los parámetros magnéticos del PU. La media y la mediana de la MRIS superan todos los valores de fondo. Al ubicar los valores de media y mediana del FAM dentro de los intervalos de evaluación propuestos en la metodología, vemos que ambos pertenecen al nivel de aumento magnético extremo ($FAM \geq 12$). La varianza, desviación estándar y coeficiente de variación muestran alta dispersión en los datos de MRIS y FAM, que contrasta con los datos de la última columna (transformación logarítmica del FAM, con previa suma de una constante de desplazamiento). Los datos de FAM se transformaron para obtener una distribución normal, estabilizar la varianza y tener valores de asimetría y curtosis cercanos a 0, situación deseable para el análisis estructural de la varianza.

Tabla 1. Estadística descriptiva para la MRIS, el FAM y su transformación logarítmica con desplazamiento, para las submuestras de PU.

	MRIS	FAM	$\ln(FAM+4.077)$
Unidades	mAm^2kg^{-1}	Adimensional	Adimensional
Número de datos	99	99	99
Media	28.26	17.10	2.91
Mediana	24.12	14.77	2.94
Varianza	320.95	149.94	0.28
Desviación estándar	17.91	12.24	0.53
Coeficiente de variación	63.38%	71.62%	18.21%
Mínimo	3.17	0.74	1.57
Máximo	129.72	79.44	4.43
Rango	126.56	78.70	2.85
Asimetría estandarizada	10.14	8.45	0.00
Curtosis estandarizada	21.04	14.58	0.26
Distribución normal ¹	No	No	Si

¹Prueba de Shapiro-Wilks; nivel alfa= 0.01

La Tabla 2 presenta los parámetros del modelo teórico de mejor ajuste al variograma experimental, que definen la varianza estructural. La Figura 1 muestra la representación gráfica de estos parámetros. La Tabla 2 muestra que el modelo teórico es aceptable porque: i) la proporción es mayor a 0.5, el modelo teórico explica el 50.2 % de la variación espacial del FAM, un 49.8 % se describe como incertidumbre espacial; ii) el coeficiente de determinación r^2 del modelo teórico es muy alto, siendo excelente ajuste entre el modelo teórico (línea negra, Figura 1a) y el variograma experimental (círculos negros, Figura 1a); iii) la suma de



Tabla 2. Modelo teórico de mejor ajuste al variograma experimental para la transformación logarítmica con desplazamiento del FAM.

Modelo	Nugget	Meseta	Proporción ¹	Rango (en metros)	r ² †	SCE ³	r V.C. ⁴
Esférico	0.1560	0.3130	0.502	4670	0.992	9.696E-05	0.224

¹Proporción = Varianza estructural/Meseta. †Coeficiente de determinación para el modelo.

³Suma de cuadrados del error. ⁴Coeficiente de correlación para la validación cruzada.

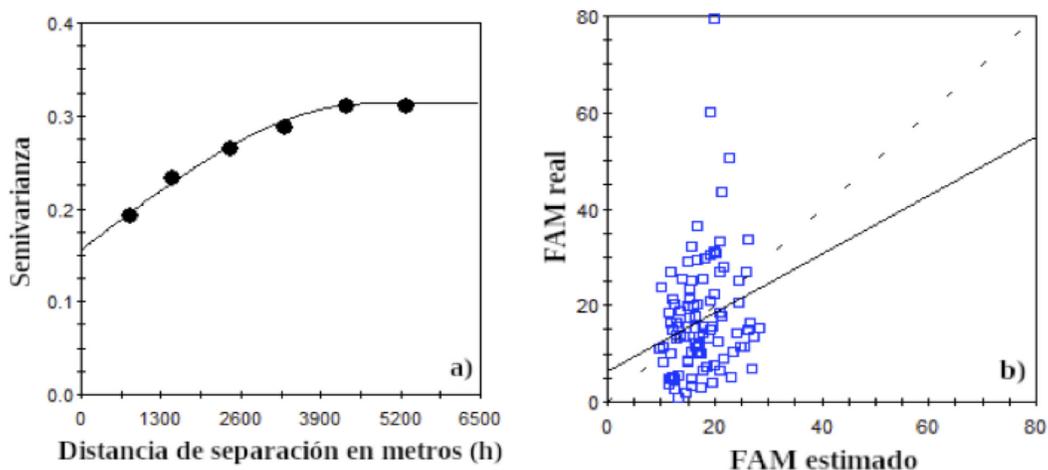


Figura 1. a) Variograma experimental (círculos negros) y modelo teórico de mejor ajuste (línea negra continua) para la función de transformación de la transformación logarítmica con desplazamiento del FAM. b) Validación cruzada; cada cuadro azul representa el par valor real/estimado; la línea segmentada es el ajuste perfecto (relación 1:1, coeficiente de correlación igual a 1) entre los valores reales y estimados; la línea negra continua representa el eje principal de la regresión obtenida luego de realizar la interpolación kriging ordinario puntual.

cuadrados del error (SCE) es cercana a cero, confirmando el excelente ajuste entre el modelo teórico y el variograma experimental. El valor del rango es pequeño; se interpreta que la correlación espacial del FAM es de carácter local o puntual en algunos sitios de muestreo; más allá de un radio de 4670 m finaliza la relación espacial del FAM entre un sitio de muestreo y los sitios de muestreo más próximos. La validación cruzada es deficiente (Tabla 2, Figura 1b) debido a que el modelo teórico explica solo el 50.2 % de la variación espacial del FAM.

La Figura 2 muestra la interpolación del FAM. Como el análisis de la varianza estructural logró representar medianamente la estructura de la correlación espacial del FAM, se puede afirmar que la predicción espacial ejecutada vía kriging ordinario puntual, describe moderadamente la variación espacial de este. El mapa representa la distribución espacial de la concentración relativa de minerales ferromagnéticos *-sensu lato-* en muestras de PU. El aspecto más relevante observado en el mapa es que únicamente presenta zonas con niveles de FAM alto, muy alto y extremo, que se interpretan como zonas con PU con un contenido relativo de minerales ferrimagnéticos de alto a extremo, en otras palabras, contaminación alta a extrema en toda el AMVA con partículas magnéticas posiblemente de origen antrópico.

Conclusiones

Al establecer un valor de fondo (umbral), se normaliza la contribución ferromagnética *-sensu lato-* de origen natural o litogénico, por lo que los valores obtenidos del FAM, que posteriormente son modelados en un



mapa de predicción espacial, presentan un mejor acercamiento a los diferentes niveles de contaminación de origen humano.

Son alarmantes los niveles de contaminación registrados por los polvos urbanos del AMVA. El mapa geostadístico revela que prácticamente toda la superficie urbana del AMVA está contaminada.

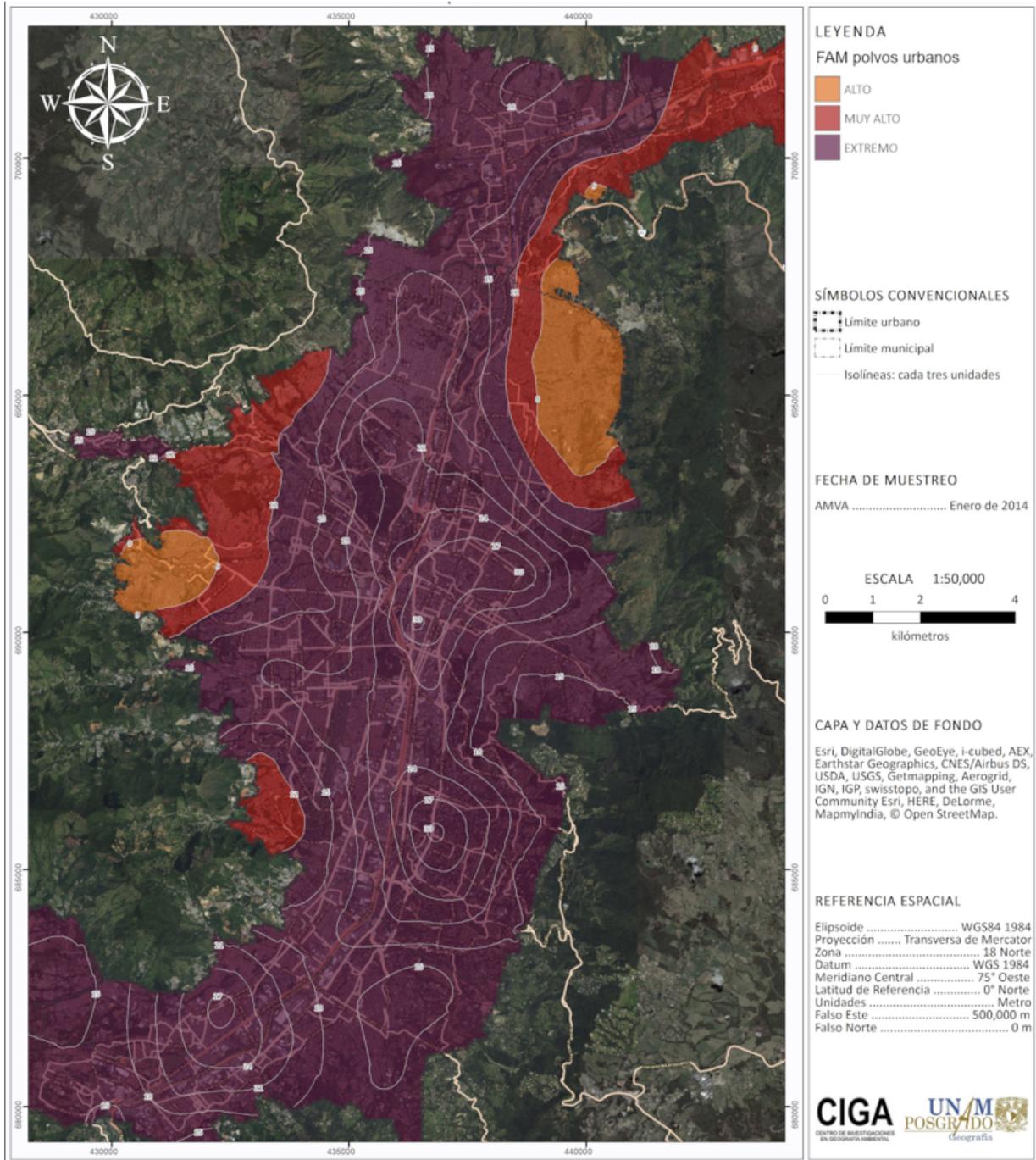


Figura 2. Mapa de distribución espacial del FAM para polvos urbanos del AMVA.



Referencias

- Amato, F., Schaap, M., Denier van der Gon, H.A.C., Pandolfi, M., Alastuey, A., Keuken, M., Querol, X., 2013. Short-term variability of mineral dust, metals and carbon emission from road dust resuspension. *Atmospheric Environment* 74, 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.037>
- Consorcio Microzonificación 2006, 2006. Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado (Informe Final para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá). Medellín, Colombia.
- DANE - Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2019. Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 [WWW Document]. Geoportel del DANE - Geovisor CNPV 2018. URL <https://geoportel.dane.gov.co/cnpv2018/?lt=4.456007353293281&lg=-73.2781601239999&z=6> (accessed 10.25.19).
- DESA - Department of Economic and Social Affairs / Population Division - UN United Nations, 2014. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352), World Urbanization Prospects 2014. United Nations, New York, U.S.A.
- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control - A sedimentological approach. *Water Research* 14, 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Harrison, R.M. (Ed.), 2006. An Introduction to Pollution Science, 1st ed. Royal Society of Chemistry, United Kingdom, Cambridge, 345 pp.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2012. Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010, 1a ed, Colombia, Bogotá D.C, 311 pp.
- Jancsek-Turóczy, B., Hoffer, A., Nyíró-Kósa, I., Gelencsér, A., 2013. Sampling and characterization of resuspended and respirable road dust. *Journal of Aerosol Science* 65, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.07.006>
- Oliver, M.A., Webster, R., 2015. Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging, SpringerBriefs in Agriculture. Springer International Publishing, Cham (ZG), Switzerland, 100 pp.
- Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R., Jeffrey, D.W., 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen* 33, 566–575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>