

Evaluación de la contaminación ambiental a partir del aumento magnético en polvos urbanos. Caso de estudio en la ciudad de Mexicali, México

Alexander Sánchez-Duque^{1,*}, Francisco Bautista^{1,2}, Avto Goguitchaichvili³, Rubén Cejudo-Ruiz³, Jaime Alonso Reyes-López⁴, Fernando Amílcar Solís-Domínguez⁵ y Juan Julio Morales-Contreras³

¹ Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental LUGA, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental CIGA, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México.

² Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, CEBAS-CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), Campus Universitario de Espinardo, C.P. 164, 30100 Murcia, España.

³ Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental LUGA, Instituto de Geofísica Unidad Michoacán IGUM, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México

⁴ Laboratorio de Ciencia y Tecnología del Agua, Suelo y Medio Ambiente, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal s/n, Col. Insurgentes Este, C.P. 21280, Mexicali, Baja California, México.

⁵ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California Campus Mexicali, Blvd. Benito Juárez s/n, C.P. 21900, Mexicali, Baja California, México.

*asanchezduq@gmail.com

RESUMEN

Se realizó una evaluación del aumento magnético en muestras recolectadas del polvo urbano asentado sobre diferentes superficies, principalmente vialidades pavimentadas y no pavimentadas, como una estrategia de aproximación indirecta al problema de contaminación ambiental en la ciudad de Mexicali (ciudad de tamaño medio en la frontera México-EE. UU.). Técnicas de magnetismo de rocas han sido usadas para analizar la concentración relativa de minerales magnéticos en las diferentes muestras, a partir de la determinación de los valores de susceptibilidad magnética específica de masa y magnetización remanente isotérmica para un pulso magnético de 0.7 T. Se calculó el aumento magnético mediante la comparación de la concentración magnética de cada muestra con respecto a la concentración magnética de una muestra seleccionada como control o testigo, recolectada de un sitio ubicado en la periferia de la ciudad con leve actividad humana, categorizado como área de conservación. Otros parámetros magnéticos como el cociente S_{200} y la temperatura de Curie fueron usados para identificar el tipo de portador magnético predominante, determinando que la magnetita impura es el mineral magnético más abundante en la mayoría de las muestras recolectadas. Técnicas de análisis geoestadístico y de interpolación (variograma experimental y Kriging ordinario, respectivamente) fueron utilizadas para determinar la distribución espacial del aumento magnético, permitiendo zonificar la ciudad por niveles de contaminación ambiental. Vialidades de alto tráfico vehicular en combinación con las categorías de uso de suelo Industrial - Corredor Urbano - Comercio y Servicios son los rasgos sobresalientes de las zonas identificadas con el nivel más alto de contaminación.

Palabras clave: magnetismo ambiental; geoestadística; contaminación urbana; uso de suelo; jerarquización vial.

ABSTRACT

Assessments of magnetic enhancement on urban dust samples collected on different surfaces, mostly paved and unpaved roads, were performed in order to evaluate the environmental contamination in Mexicali (medium-sized city on the Mexico-USA border). Rock and mineral magnetic techniques consisted of systematic measurements of mass-specific magnetic susceptibility and isothermal remanent magnetization at 0.7 T. Magnetic enhancement was estimated by comparing magnetic concentration for each sample relative to reference value obtained from the site with almost no human activity also known as conservation area in the suburb of town. Additional magnetic parameters as the S_{200} ratio and Curie temperatures were used to identify predominant magnetic carriers. These experiments indicate that impure magnetite is the main mineral in most studied samples. Geostatistical analysis and interpolation techniques (experimental variogram and ordinary Kriging, respectively) were carried out in order to determine the spatial distribution of magnetic enhancement and relative levels of environmental contamination. High traffic roads with industrial areas as well as some land categories yielded unusually high level of contamination.

Key words: environmental magnetism; geostatistics; urban contamination; land use; road hierarchies.

INTRODUCCIÓN

El polvo asentado sobre diferentes superficies de las zonas urbana y periurbana de una ciudad está compuesto por una mezcla heterogénea de materiales originados en procesos naturales (meteorización de las rocas, re-suspensión de partículas de suelo por acción del viento, polen

y otros fragmentos vegetales, etc.) o que han sido liberados, producidos y/o transformados a partir de materiales terrestres por diversas actividades humanas (industria; tráfico vehicular que produce partículas producto del desgaste de vialidades, frenos, llantas y emisiones del tubo de escape; construcción y sus materiales asociados; quemas agrícolas; minería; etc.); se sabe que la exposición aguda o crónica a algunos de estos materiales producen enfermedades conocidas, mientras que de otros se tiene sospecha o se han postulado como causantes de enfermedades (Plumlee y Ziegler, 2003). Una porción del polvo urbano (PU) corresponde a partículas sólidas que pueden ser re-suspendidas reiteradamente en el aire por la acción de corrientes de viento naturales o inducidas por el tráfico vehicular (Amato et al., 2013a; Amato et al., 2013b) y que por sus características de tamaño y forma podrían ser inhaladas por humanos, motivo por el cual el PU es considerado como una fuente importante de contaminación del aire respirable (Amato et al., 2014). La Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que en el año 2012 la exposición al aire contaminado en zonas urbanas y rurales ocasionó siete millones de muertes prematuras (en menores de 60 años), una de cada ocho muertes en el planeta, confirmando así que en la actualidad tal exposición constituye el mayor riesgo ambiental para la salud (WHO, 2014). Por lo tanto, el PU puede ser considerado como una fuente importante de material particulado aerotransportado al igual que de otros elementos tóxicos que circulan en la atmósfera de las ciudades (Vega et al., 2001; Watson y Chow, 2001; Ho et al., 2003; Chow et al., 2004); su presencia y la exposición crónica de la población al mismo deben considerarse como un factor de riesgo que aumenta la probabilidad que tienen los ciudadanos de sufrir una enfermedad y debe afrontarse como un problema de salud pública.

En este sentido, es importante señalar que según la *Urban outdoor air pollution database* 2012 (WHO, 2011) Mexicali fue reportada como la ciudad con el aire más contaminado de México según el parámetro de calidad del aire PM_{10} (partículas sólidas aerotransportadas con diámetros menores a $10\ \mu m$), con valores de concentración media anual que fluctuaron entre 90 a $120\ \mu g\cdot m^{-3}$ para el período 1998-2005 según datos del Sistema de Cálculo de Indicadores de la Calidad del Aire (INECC, 2012), cifras que exceden ampliamente el valor de referencia de $20\ \mu g\cdot m^{-3}$ de concentración anual media del PM_{10} propuesto por la OMS y el valor máximo de $40\ \mu g\cdot m^{-3}$ de la norma mexicana NOM-025-SSA1-2014 (SSA, 2014). Estas partículas ocasionan desde leves irritaciones del tracto respiratorio hasta deterioro en la función pulmonar; la exposición crónica incrementa el riesgo de muerte por cardiopatías, neumopatías, así como cáncer de pulmón (WHO, 2006a, 2006b; IARC, 2013). En muestras recolectadas en Mexicali de PM_{10} y $PM_{2.5}$ (partículas sólidas aerotransportadas con diámetros menores a $2.5\ \mu m$), Osornio-Vargas et al. (2011) identificaron partículas provenientes del suelo mezcladas con partículas de origen antrópico ligadas a procesos de combustión, encontrando que las primeras podrían participar en graves procesos de salud como la fibrosis pulmonar, mientras que las segundas podrían tener un fuerte impacto sobre los pulmones y en enfermedades cardiovasculares sistémicas. Meza et al. (2010) en un estudio sobre la estimación de factores de emisión de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en vías urbanas de Mexicali (gramos de polvo re-suspendido por kilómetro recorrido de un vehículo) concluyeron que a pesar de que la erosión del viento es una fuente significativa de polvo re-suspendido en las vías urbanas de la ciudad, la acción mecánica de los vehículos (velocidad, rodamiento de las llantas que pulverizan el material del lecho de las vialidades, peso y tipo de vehículo) en vías pavimentadas y no pavimentadas contribuye con una emisión importante.

El análisis de algunos parámetros magnéticos de las partículas que conforman el PU es una herramienta cualitativa para estimar el grado de contaminación ambiental local o regional. Según Jordanova et al. (2012) el uso de parámetros magnéticos en estudios cualitativos de

contaminación se basa en el supuesto que la mayoría de contaminantes están acompañados o ligados a una fracción de partículas magnéticas que contienen hierro, por lo que el PU asentado en un sitio específico de una zona urbana tiene una firma magnética determinada por el efecto acumulativo de fracciones magnéticas, con la que se podría identificar cambios espaciales y/o temporales indicadores de diferencias entre sitios del contenido de partículas magnéticas o de cambios en la fuente de origen de los polvos. Los parámetros magnéticos han demostrado ser de utilidad en la identificación de áreas contaminadas en zonas urbanas a través de la evaluación del aumento magnético (AM) y su relación con actividades humanas específicas como el tráfico vehicular y/o la presencia de industrias emisoras de cenizas con presencia de material magnético (Hoffmann et al., 1999; Shilton et al., 2005; Kim et al., 2009; Aguilar et al., 2011; Aguilar et al., 2013a; Aguilar et al., 2013b) de gran utilidad como valoración inicial en estudios detallados de la contaminación causada por altas concentraciones de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) en sedimentos depositados en vialidades (Crosby et al., 2014).

Este estudio dirige su atención en conocer la distribución espacial de la contaminación en Mexicali, usando técnicas de análisis geoes-tadístico, cuantificando el cambio en los valores del AM en diferentes sitios de la ciudad, a partir de la determinación de los valores de Susceptibilidad Magnética Específica de Masa (χ) y la Magnetización Remanente Isotérmica a 0.7 T ($MR_{0.7T}$) en muestras de PU recolectadas en áreas urbanas y periurbanas, identificando el principal portador magnético presente en las muestras con AM detectado, las categorías de uso de suelo y tipos de vialidad relacionados con los diferentes niveles de contaminación y las localidades de la ciudad con mayor concentración de partículas magnéticas (*hotspots*), como una alternativa en la identificación de sitios con un nivel alto de contaminación antrópica, donde se debería priorizar el uso de recursos públicos y privados de los sectores Salud y Medio Ambiente para la elaboración de estudios detallados de contaminación ambiental con técnicas químicas analíticas que permitan justificar a futuro la toma de decisiones tendientes a mitigar y/o controlar las mayores fuentes de contaminación en Mexicali.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La ciudad de Mexicali (México) está ubicada en la frontera entre México y EE. UU., en el valle de Mexicali, perteneciente a la llanura deltaica salina del Río Colorado, de clima árido cálido BWh de acuerdo a la clasificación de Köppen (INEGI, 2014), con una precipitación media anual de 74.5 mm y altitud media de 3 m s.n.m. (SMN, 2014). La ciudad está edificada sobre depósitos limo aluviales (Qptholm) semi-consolidados del Pleistoceno-Holoceno que afloran el valle de Mexicali (Terán et al., 2003), en suelos de los grupos Tecnosol, Vertisol y Regosol (INEGI, 2014). La ciudad tiene una población aproximada de 759,537 habitantes, 207.54 km² de área urbanizada, densidad de población de 3,661.3 habitantes por km², con un índice de motorización que varió de 531 a 760 vehículos por cada 1,000 habitantes del año 2005 al 2012 respectivamente (IMIP, 2014). La principal actividad económica de la ciudad es la manufactura industrial seguida del comercio de bienes y la prestación de servicios (INEGI, 2012).

Muestreo y preparación de muestras

Se realizó un muestreo sistemático de PU en 108 sitios con una equidistancia de 1.4 km (Figura 1), durante las dos primeras semanas de abril de 2013. En cada sitio se recogió el PU barrido en una superficie de 1 m² pavimentada o no pavimentada sobre la vialidad o sobre 1 m² de la superficie del suelo si no existía vialidad (Bautista et al., 2011; Aguilar et

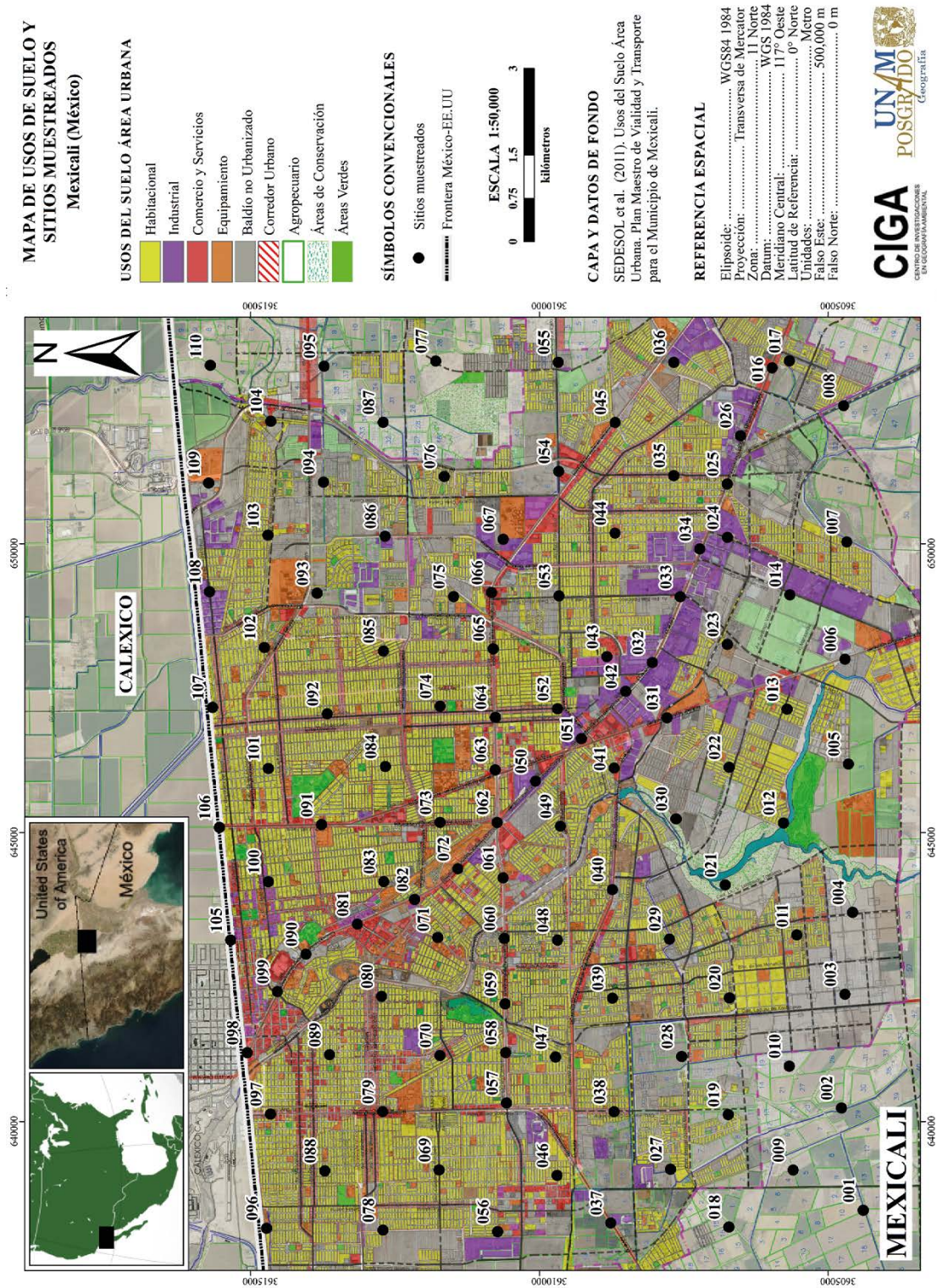


Figura 1. Mapa de uso de suelo y sitios de muestreo en la ciudad de Mexicali. Capa “Usos del Suelo Área Urbana” de SEDESOL et al. (2011b).

al., 2013a; Aguilar et al., 2013b). Se registró la referencia geográfica con el sistema de coordenadas UTM Zona 11 N con *datum* WGS84, uso de suelo, tipo de vialidad y la clase de superficie donde se barrió el polvo. La clasificación registrada en el trabajo de campo para el uso de suelo y el tipo de vialidad fue posteriormente ajustada con la clasificación oficial del Ayuntamiento de Mexicali (SEDESOL et al., 2011a). Para definir el uso de suelo se emplearon ocho categorías: Agropecuario; Área de Conservación (hábitat de gran diversidad de flora y fauna con alto valor paisajístico); Comercio y Servicios; Corredor Urbano (áreas de influencia al lado de las vialidades principales con múltiples usos como comercio, vivienda, servicios y oficinas, etc.); Equipamiento (escuelas, centros de recreación y deporte, iglesias, ayuntamiento, etc.); Baldío no Urbanizado (predio urbano sin construcciones e improductivo); Habitacional; Industrial. Las vialidades fueron clasificadas de acuerdo a su tipo en siete clases: Troncal 1 (Boulevard Adolfo López Mateos –incluye al Corredor Industrial Palaco CIP–); Troncal 2 (Boulevard Lázaro Cárdenas); Primaria; Secundaria o Colectora; Terciaria o Local; Rural; Sin Vialidad. Las superficies de barrido del polvo se clasificaron en tres clases: Pavimentada; No Pavimentada; Suelo (en sitios sin vialidad).

Las muestras se secaron a la sombra por una semana en el Laboratorio de Suelos y Aguas, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia, en un espacio diseñado para tal propósito. Posteriormente fueron tamizadas con una red plástica de 1 mm de abertura de luz (malla 18) con el fin de remover elementos de tamaño grueso como vidrios, gravas, plásticos, fragmentos de vegetales, etc. De cada muestra tamizada se tomó una submuestra que fue encapsulada en un contenedor cúbico de acrílico de 8 cm³ de volumen interno, adecuado para realizar mediciones magnéticas. Se determinó el peso neto de cada muestra (descartando el peso del contenedor) para calcular la densidad (ρ).

Mediciones magnéticas

La determinación de las propiedades magnéticas de los PU se realizó en el Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental (LUGA), UNAM Campus Morelia, mediante la aplicación de métodos de magnetismo de rocas (Thompson y Oldfield, 1986; Evans y Heller, 2003; Aguilar et al., 2013b; Jordanova et al., 2014; Xia et al., 2014), con la finalidad de determinar la concentración relativa de minerales magnéticos, tamaño de grano magnético y tipo de mineral magnético dominante. Primero se determinó la susceptibilidad magnética de baja (κ_{LF}) y alta (κ_{HF}) frecuencias (470 Hz y 4,700 Hz, respectivamente) empleando un susceptibilímetro Bartington MS2B de frecuencia dual (Dearing, 1999). A partir de los valores de κ_{LF} y κ_{HF} , se calcularon la susceptibilidad magnética específica de masa ($\chi = \kappa_{LF}/\rho$), que evalúa la concentración magnética, y el porcentaje de la susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia ($\chi_{FD}\%$), que permite detectar la presencia de minerales ferrimagnéticos de grano ultra fino, de tamaño menor a 0.02 μm , debido a su comportamiento superparamagnético (Dearing et al., 1996; Liu et al., 2012).

En cada muestra se indujo una Magnetización Remanente Isotérmica (MRI) por pasos, mediante la aplicación de pulsos magnéticos unidireccionales de intensidad creciente en cada paso (0.025, 0.050, 0.075, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 y 0.7 T), por medio de un magnetizador de pulsos ASC IM10-30, hasta alcanzar la magnetización de saturación en la mayoría de los minerales magnéticos presentes ($\text{MRI}_{0.7\text{T}}$: MRI adquirida a 0.7 T). La magnetización remanente inducida luego de cada pulso magnético fue determinada empleando un magnetómetro de giro Molspin LTD. Las curvas de adquisición MRI y el valor de $\text{MRI}_{0.7\text{T}}$ indican la concentración relativa y el tipo de minerales magnéticos portadores de la remanencia magnética (Evans y Heller, 2003; Liu et al., 2012). Una vez adquirida la $\text{MRI}_{0.7\text{T}}$, se indujo una magnetización

en dirección opuesta mediante la aplicación de un pulso magnético de 0.2 T en dirección opuesta a la original ($\text{MRI}_{-0.2\text{T}}$) para determinar el cociente S_{200} ($S_{200} = \text{MRI}_{-0.2\text{T}}/\text{MRI}_{0.7\text{T}}$), que usualmente varía desde 0 a 1, útil para el análisis de la abundancia relativa de minerales antiferromagnéticos de alta coercitividad (p.ej. hematita, goetita) mezclados con minerales ferrimagnéticos (p.ej. magnetita, titanomagnetita, titanomaghemita) (Liu et al., 2012), y del que se han obtenido resultados satisfactorios en otros estudios de suelo urbano superficial y PU para detectar pequeñas diferencias en coercitividad (Aguilar et al., 2011; Aguilar et al., 2013a; Aguilar et al., 2013b). Se utilizó el diagrama de dispersión $\text{MRI}_{0.7\text{T}}$ versus χ para encontrar la relación de las partículas magnéticas con el uso de suelo y tipo de vialidad (Lecoanet et al., 2003).

En muestras seleccionadas de diferente uso de suelo y tipo de vialidad (de concentración relativa de minerales magnéticos alta, intermedia y baja, según los valores obtenidos para los parámetros χ y $\text{MRI}_{0.7\text{T}}$) se obtuvieron curvas de variación de la susceptibilidad magnética en función de la temperatura (curvas κ -T), calentando progresivamente cada muestra desde temperatura ambiente hasta alcanzar los 700 °C, a una tasa de 10 °C min⁻¹, para luego ser enfriada usando la misma tasa. Se utilizó un susceptibilímetro Bartington MS2 equipado con horno. La finalidad del procedimiento fue estimar la estabilidad termomagnética y el tipo de portador magnético dominante mediante la temperatura de Curie (T_C). La T_C se determinó mediante el método diferencial de Tauxe (1998) en la región de rápido decrecimiento de la susceptibilidad magnética de la curva de calentamiento.

Análisis de datos y evaluación del aumento magnético

Se realizó un análisis exploratorio de los datos para cada parámetro magnético evaluado con el fin de identificar coordenadas geográficas erróneas y valores atípicos. Se realizó un análisis estadístico descriptivo y se contrastó la normalidad de los datos para cada parámetro magnético mediante la prueba de chi-cuadrado con un nivel de significancia (o nivel alfa, α) del 5%, la asimetría y la curtosis estandarizadas. Debido a que la mayoría de los datos no provenían de una distribución normal se aplicó un análisis de varianza no paramétrico tipo Kruskal-Wallis (Kruskal y Wallis, 1952), que evalúa la hipótesis de que las medianas de las diferentes categorías de uso de suelo o tipos de vialidad (factores) son iguales para cada parámetro magnético analizado (variable dependiente). Se emplearon diagramas de cajas y bigotes para diferenciar estadísticamente los usos de suelo y tipos de vialidades que presentan los mayores y menores valores de concentración magnética, y establecer las semejanzas y diferencias entre las diversas categorías o clases a través de la comparación de sus medianas.

Se calculó el AM empleando χ ($\text{AM}-\chi$) y $\text{MRI}_{0.7\text{T}}$ ($\text{AM}-\text{MRI}_{0.7\text{T}}$), una adaptación del factor de contaminación (FC) utilizado por Tomlinson et al. (1980), mediante el uso de la relación $\text{AM}_i = C_i/C_{\text{ref}}$, donde C_i es el valor del parámetro magnético para el i -ésimo sitio y C_{ref} es el valor de fondo de la concentración magnética. Como valores de fondo se seleccionaron los resultados obtenidos para el sitio 077 ($\chi = 0.34 \mu\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$; $\text{MRI}_{0.7\text{T}} = 3.37 \text{ mAm}^2\cdot\text{kg}^{-1}$), sitio que reúne características ideales para tal consideración: Área de Conservación, Sin Vialidad, Suelo como superficie de barrido del polvo, situado en la periferia de la ciudad, con baja intervención humana. Para evaluar los valores de $\text{AM}-\chi$ y $\text{AM}-\text{MRI}_{0.7\text{T}}$ obtenidos en cada sitio, se emplearon los intervalos propuestos por Mmolawa et al. (2011) para los criterios de clasificación del FC, adecuándolos para interpretar el AM de la siguiente manera: a) $\text{AM} \leq 1$, sin aumento magnético; b) $1 < \text{AM} \leq 3$, aumento bajo; c) $3 < \text{AM} \leq 6$, aumento intermedio; d) $\text{AM} > 6$, aumento alto.

Con las matrices de datos georreferenciados depuradas se procedió a determinar el patrón de distribución espacial de los valores de $\text{AM}-\chi$ y $\text{AM}-\text{MRI}_{0.7\text{T}}$ a través del análisis geoestadístico. Antes del análisis, los datos fueron transformados logarítmicamente ($\log_{10}$) para garantizar

Tabla 1. Estadística descriptiva para los parámetros magnéticos de las 108 muestras recolectadas.

Variable	Unidades	Media	Mediana	Desviación estándar	Coef. de variación	Mín.	Máx.	Rango	Asimetría estand.	Curtosis estand.	Distribución normal ^a
χ	$\mu\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	1.55	1.35	1.13	73.24%	0.18	6.85	6.67	7.87	10.35	No
$\chi_{\text{FD}}\%$	%	1.03	0.76	1.08	104.99%	0.00	5.69	5.69	6.68	7.12	No
$\text{MRI}_{0.7\text{T}}$	$\text{mAm}^2\cdot\text{kg}^{-1}$	12.51	9.45	10.63	84.94%	1.61	87.27	85.65	15.89	47.37	No
S_{200}	Adimensional	0.91	0.92	0.07	7.38%	0.39	1.00	0.61	-21.50	75.36	No
$\text{MRI}_{0.7\text{T}}/\chi$	$\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$	8.43	8.25	2.23	26.41%	3.47	14.77	11.29	2.01	0.91	Si
$\text{AM}-\chi$	Adimensional	4.55	3.96	3.33	73.25%	0.52	20.12	19.60	7.87	10.35	No
$\text{AM}-\text{MRI}_{0.7\text{T}}$	Adimensional	3.71	2.80	3.15	84.94%	0.48	25.87	25.39	15.89	47.37	No

^aprueba chi-cuadrado; nivel alfa = 0.05

normalidad en su distribución. Se realizó el análisis de la estructura de la semivarianza calculando el semivariograma experimental, que fue comparado con diferentes semivariogramas teóricos a fin de seleccionar el modelo de mejor ajuste (Delgado *et al.*, 2010), empleando el programa GS+ versión 9 (Gamma Design Software, 2013). El semivariograma teórico seleccionado es el modelo más adecuado para la interpolación de los datos (Isaaks y Srivastava, 1990; Webster y Oliver, 1990) y es una técnica superior que la interpolación simple puesto que explica la correlación espacial existente entre los 108 sitios muestreados para el AM ($\text{AM}-\chi$ o $\text{AM}-\text{MRI}_{0.7\text{T}}$), proporcionándole solidez a la estimación de los valores del AM obtenida mediante interpolación en puntos sin información disponible. Se empleó la técnica Kriging ordinario para la interpolación. La representación cartográfica se realizó a escala

1:50,000, bajo proyección UTM Zona 11N, elipsoide y *datum* horizontal del World Geodetic System 84 (WGS84), editando mapas de contornos de cuatro clases para el AM ($\text{AM}-\chi$ y $\text{AM}-\text{MRI}_{0.7\text{T}}$) utilizando el ArcGis 9.1 (ESRI, 2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estadística descriptiva

El resumen estadístico general de los diferentes parámetros magnéticos se presenta en la Tabla 1; en la Tabla 2 se presenta un resumen estadístico de los parámetros magnéticos en el que se discrimina por factores categóricos (uso de suelo, tipo de vialidad, superficie

Tabla 2. Resumen estadístico de los parámetros magnéticos discriminando por categorías de uso de suelo, tipo de vialidad y superficie de recolección de polvos urbanos.

Factor Categórico ^a :		Parámetros magnéticos ^b																				
Uso de suelo	N	χ			$\chi_{\text{FD}}\%$			$\text{MRI}_{0.7\text{T}}$			S_{200}			$\text{MRI}_{0.7\text{T}}/\chi$			$\text{AM}-\chi$			$\text{AM}-\text{MRI}_{0.7\text{T}}$		
		ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE
		ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE
Industrial	11	2.72	1.93	1.78	0.13	0.00	0.21	26.05	16.00	22.39	0.94	0.93	0.02	9.22	8.91	1.70	7.98	5.66	5.24	7.72	4.74	6.64
Comercio y Servicios	25	2.06	1.76	0.91	0.92	0.84	0.82	16.50	14.34	7.07	0.94	0.94	0.02	8.13	8.16	1.27	6.05	5.17	2.68	4.89	4.25	2.10
Corredor Urbano	11	1.53	1.57	0.95	0.68	0.13	1.33	14.20	15.27	9.48	0.92	0.93	0.02	9.10	8.92	1.60	4.50	4.62	2.80	4.21	4.53	2.81
Habitacional	41	1.37	1.11	0.92	1.09	1.14	0.85	9.25	8.26	5.11	0.90	0.92	0.10	7.32	7.20	1.91	4.02	3.28	2.70	2.74	2.45	1.51
Equipamiento	4	0.89	0.60	0.74	0.22	0.00	0.43	8.03	5.97	5.62	0.87	0.88	0.04	9.76	9.95	1.14	2.60	1.74	2.17	2.38	1.77	1.66
Agropecuario	7	0.65	0.57	0.50	1.84	2.01	0.96	5.66	5.92	1.69	0.87	0.90	0.05	11.32	13.19	4.21	1.91	1.67	1.46	1.68	1.76	0.50
Baldío no Urbanizado	6	0.56	0.52	0.25	2.62	2.15	1.88	4.92	4.59	1.58	0.89	0.90	0.04	9.41	9.41	2.65	1.64	1.51	0.72	1.46	1.36	0.47
Área de Conservación	3	0.50	0.53	0.14	1.77	2.44	1.33	5.17	5.59	1.63	0.89	0.89	0.01	10.32	10.50	0.34	1.46	1.56	0.42	1.53	1.66	0.48
Tipo de vialidad	N	χ			$\chi_{\text{FD}}\%$			$\text{MRI}_{0.7\text{T}}$			S_{200}			$\text{MRI}_{0.7\text{T}}/\chi$			$\text{AM}-\chi$			$\text{AM}-\text{MRI}_{0.7\text{T}}$		
		ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE
		ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE
Bldv. ALM	15	3.03	2.77	1.41	0.35	0.28	0.44	27.63	22.49	18.27	0.95	0.96	0.02	8.84	8.42	1.34	8.90	8.14	4.13	8.19	6.67	5.42
Primaria	15	1.77	1.35	1.13	1.22	0.90	1.40	14.74	12.44	8.34	0.93	0.93	0.02	8.61	8.65	1.41	5.22	3.97	3.33	4.37	3.69	2.47
Bldv. LC	11	1.48	1.48	0.52	0.72	0.84	0.57	12.57	13.75	4.62	0.93	0.93	0.02	8.46	8.31	0.78	4.36	4.35	1.52	3.73	4.07	1.37
Secundaria	13	1.26	1.37	0.42	0.88	0.83	0.82	10.77	9.70	5.95	0.92	0.92	0.02	8.27	7.10	2.39	3.69	4.03	1.23	3.19	2.87	1.76
Terciaria	43	1.32	1.10	0.95	0.97	0.86	0.83	8.70	7.70	5.11	0.89	0.91	0.10	7.52	7.33	2.31	3.88	3.22	2.80	2.58	2.28	1.51
Rural	6	0.54	0.58	0.20	2.36	2.34	0.41	6.09	6.33	1.60	0.88	0.90	0.04	12.01	13.02	2.68	1.59	1.70	0.60	1.80	1.88	0.47
Sin vialidad	5	0.50	0.53	0.17	2.46	2.44	2.43	5.27	5.59	1.75	0.89	0.90	0.03	10.59	10.53	0.93	1.47	1.56	0.49	1.56	1.66	0.52
Superficie	N	χ			$\chi_{\text{FD}}\%$			$\text{MRI}_{0.7\text{T}}$			S_{200}			$\text{MRI}_{0.7\text{T}}/\chi$			$\text{AM}-\chi$			$\text{AM}-\text{MRI}_{0.7\text{T}}$		
		ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE
		ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE	ME	MD	DE
Pavimento	79	1.81	1.51	1.15	0.86	0.68	0.90	14.69	12.44	11.21	0.92	0.93	0.07	8.14	8.15	1.67	5.31	4.45	3.37	4.36	3.69	3.32
Terracería	22	0.94	0.66	0.81	1.21	1.03	1.02	6.87	5.85	6.40	0.88	0.90	0.04	8.80	7.58	3.56	2.76	1.93	2.38	2.04	1.74	1.90
Suelo	7	0.53	0.59	0.15	2.35	2.44	2.02	5.60	6.27	1.53	0.88	0.89	0.02	10.59	10.53	0.76	1.55	1.72	0.43	1.66	1.86	0.46

^aBldv. ALM, Boulevard Adolfo López Mateos; Bldv. LC, Boulevard Lázaro Cárdenas. ^bN, número de muestras; ME, media; MD, mediana; DE, desviación estándar.

Tabla 3. Prueba de Kruskal-Wallis para los parámetros magnéticos χ y $MRI_{0.7T}$ discriminando según las categorías de uso de suelo y tipo de vialidad.

Factor: Uso de suelo	N = 108	Rango medio de la variable dependiente		Factor: Tipo de vialidad	N = 108	Rango medio de la variable dependiente	
		χ	$MRI_{0.7T}$			χ	$MRI_{0.7T}$
Industrial	11	79.23	85.00	Blvd. Adolfo López Mateos	15	90.77	94.20
Comercio y Servicios	25	75.40	77.24	Primaria	15	62.07	67.20
Corredor Urbano	11	57.55	62.09	Blvd. Lázaro Cárdenas	11	61.45	65.45
Habitacional	41	50.60	45.51	Secundaria	13	52.12	51.54
Equipamiento	4	31.38	36.50	Terciaria	43	48.17	42.02
Agropecuario	7	21.79	23.14	Rural	6	16.58	27.50
Baldío no Urbanizado	6	17.17	17.67	Sin Vialidad	5	13.80	20.60
Área de Conservación	3	13.67	19.00				
Estadística		42.17	48.12	Estadística		40.59	45.17
Valor-P		4.82E-07 ^a	3.37E-08 ^a	Valor-P		3.48E-07 ^a	4.34E-08 ^a

^aDiferencia estadísticamente significativa.

de recolección del PU). Los valores más bajos de los parámetros χ y $MRI_{0.7T}$ corresponden al sitio 056 (uso de suelo Habitacional, vialidad Terciaria), ubicado en la zona periurbana de la ciudad (Figura 1). En contraste, los valores más altos para ambos parámetros corresponden al sitio 042 (uso de suelo Industrial; vialidad Boulevard Adolfo López Mateos), los cuales son 20.1 y 22.8 veces más altos que los valores de fondo de χ y $MRI_{0.7T}$ del sitio 077 respectivamente.

La prueba de chi-cuadrado al igual que los valores de asimetría y curtosis rechazan la hipótesis de que todos los parámetros magnéticos tienen una distribución normal de sus datos, exceptuando el cociente $MRI_{0.7T}/\chi$ (Tabla 1).

Usos de suelo, tipo de vialidad y clase de superficie muestreada

La prueba de Kruskal-Wallis es concluyente en afirmar que existe una diferencia significativa de las medianas de las diferentes categorías de uso de suelo y clases de vialidad para χ y $MRI_{0.7T}$ (Tabla 3). En la Tabla 2 se observa con mayor detalle los valores de las medianas según las diferentes categorías.

En los diagramas de cajas y bigotes de las Figuras 2a y 2c se observa que para ambos parámetros magnéticos existe un primer grupo de categorías de uso de suelo (Agropecuario - Baldío no Urbanizado - Área de Conservación) cuyas medianas estadísticamente son iguales, con un nivel de confianza del 95%, debido a la superposición de los intervalos de confianza de sus medianas, representados de manera gráfica por una muesca o estrechamiento en la caja (Figura 2). También se puede identificar un segundo grupo de categorías de uso de suelo (Industrial - Comercio y Servicios - Corredor Urbano), con medianas estadísticamente iguales entre sí, que se diferencia claramente del primer grupo. Con respecto de los tipos de vialidad, los diagramas de las Figuras 2b y 2d revelan tres grupos de clases viales diferentes: a) Rural - Sin Vialidad; b) Boulevard Adolfo López Mateos; y c) Boulevard Lázaro Cárdenas - Primaria. Las relaciones entre otras categorías de uso de suelo y clases de vialidad con los grupos detectados son de mayor complejidad.

Las curvas MRI presentan un comportamiento asintótico alrededor del pulso de 0.3 T en todos los sitios analizados. Consecuentemente, podemos afirmar que se trata de la misma fuente magnética para todas las muestras y que las comparaciones entre los parámetros son válidas. En este paso del tratamiento la inducción magnética (**B**) ha logrado que la mayoría de los minerales magnéticos presentes en las muestras alcancen su magnetización de saturación, comportamiento observable en las curvas MRI seleccionadas de la Figura 3. Para la magnetita un campo $B \approx 0.3$ T se considera como un campo crítico donde la magnetización

no responde más (saturación) a incrementos en el campo aplicado (Liu et al., 2012). En la Figura 3 también se aprecia diferenciación según la categoría de uso de suelo o clase de vialidad en los valores obtenidos de $MRI_{0.7T}$ de los sitios seleccionados, cuestión antes observada en el

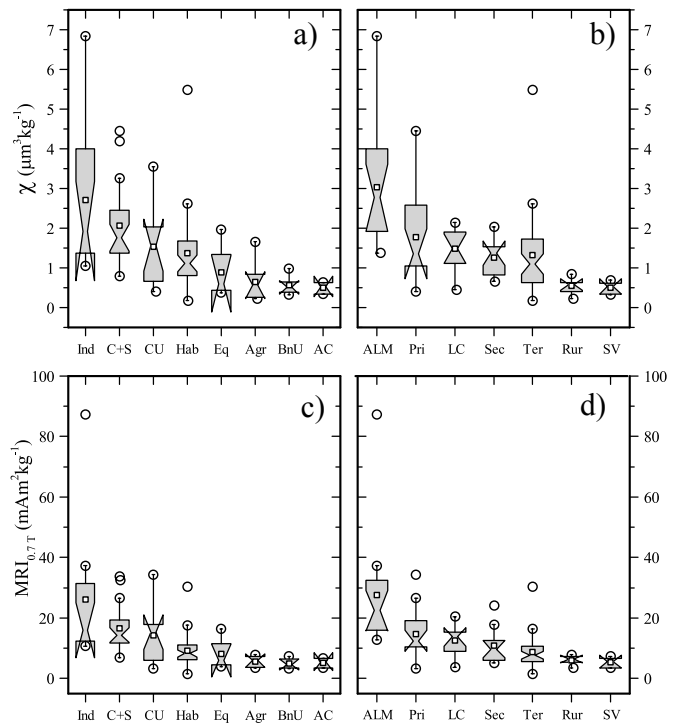


Figura 2. Diagramas de cajas y bigotes de χ para a) uso de suelo, b) tipo de vialidad; y de $MRI_{0.7T}$ para c) uso de suelo, d) tipo de vialidad. La caja representa el rango intercuartílico ($RQ=Q_3-Q_1$) del 50% de los datos, y sus límites definen el primer (Q_1) y tercer cuartil (Q_3). El límite superior del bigote está definido por $Q_3+1.5RQ$ y el límite inferior por $Q_1-1.5RQ$. La muesca o estrechamiento de la caja corresponde a la mediana con un intervalo de confianza del 95%. El cuadro blanco al interior de la caja representa la media y los círculos los valores atípicos. Ind (Industrial); C+S (Comercio y Servicios); CU (Corredor Urbano); Hab (Habitacional); Eq (Equipamiento); Agr (Agropecuario); BnU (Baldío no Urbanizado); AC (Área de Conservación). ALM (Boulevard Adolfo López Mateos); Pri (Primaria); LC (Boulevard Lázaro Cárdenas); Sec (Secundaria); Ter (Terciaria); Rur (Rural); SV (Sin Vialidad).

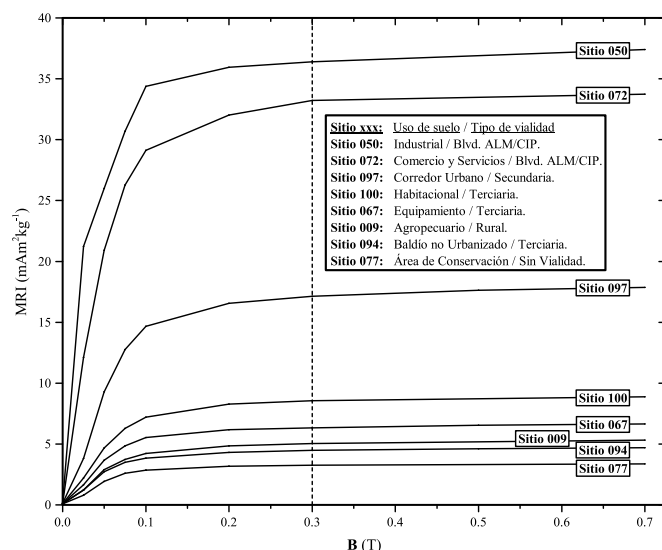


Figura 3. Curvas MRI de algunos sitios representativos de diferentes categorías de uso de suelo y tipos de vialidad. La línea punteada en el pulso de 0.3 T marca el punto a partir del cual inicia (o ya ha iniciado en algunas muestras) el comportamiento asintótico de las curvas MRI.

análisis de los diagramas de cajas y bigotes, verificable al observar la variación de los valores de media y mediana del parámetro magnético $MRI_{0.7T}$ según los factores categóricos de la Tabla 2, y que refleja una mayor o menor concentración relativa de minerales magnéticos, condición atribuible al aumento de minerales de tipo ferrimagnético originados en las diversas actividades humanas desarrolladas en el sitio de muestreo y su entorno más próximo, actividades que tienen una relación intrínseca con el uso de suelo y el tipo de vialidad del punto de recolección de la muestra.

El diagrama bivariado de dispersión $MRI_{0.7T}$ versus χ se representa gráficamente en la Figura 4a. Se observa una baja dispersión de los valores, con una tendencia casi lineal, que indica la presencia de portadores magnéticos similares y ferrimagnéticos (Thompson y Oldfield, 1986) en la mayoría de los sitios muestreados. También se observan patrones de agrupamiento de sitios según su uso de suelo y tipo de vialidad, y relaciones entre grupos semejantes a las que ya fueron descritas en el análisis de la Figura 2. Los valores más alejados del origen revelan sitios con mayor concentración magnética, concentración que se determina de manera relativa a través de las magnitudes de los parámetros magnéticos $MRI_{0.7T}$ y χ , que como ya se discutió en las curvas MRI pueden ser consecuencia de una mayor presencia de minerales ferrimagnéticos de origen antrópico relacionados con usos de suelo específicos (Industrial - Comercio y Servicios - Corredor Urbano; Figura 4a1), clases de vialidad (Boulevard Adolfo López Mateos - Primaria; Figura 4a2) y superficies de barrido (Pavimentada; Figura 4a3). Los valores cercanos al origen, de baja concentración magnética, pertenecen a un grupo de muestras que se asocian con: a) categorías de uso de suelo de Área de Conservación - Baldío no Urbanizado - Agropecuario (Figura 4a1); b) clase de vialidad Rural - Terciaria - Sin Vialidad (Figura 4a2); y c) muestras sobre superficie No Pavimentada - Suelo (Figura 4a3).

La Figura 4b muestra el diagrama bivariado de dispersión de χ_{FD} versus χ . Los valores obtenidos para el parámetro $\chi_{FD}\%$ van desde 0 hasta 5.69% (Tabla 1), valores que pueden ser interpretados según Dearing (1999) como concentraciones bajas (0–2%) a intermedias (2–10%) de granos superparamagnéticos (SP) de tamaño ultrafino

(< 0.02 μm). Nótese como la mayoría de valores obtenidos están en el intervalo de 0–2%, circunstancia que se define como una ausencia virtual de granos SP (Dearing, 1999), por lo que se puede inferir que las muestras poseen una gran cantidad de granos magnéticos de tamaño grueso con débil o nula dependencia de la frecuencia, de dominio de estado magnético sencillo estable y/o granos gruesos multidominio (MD), probablemente originados en actividades humanas, con nula o insignificante presencia de granos SP. El comportamiento MD se presenta a partir tamaños de cristal magnético superiores a 1 μm (Maher y Thompson, 1999). El intervalo de 2–6% se interpreta como una mezcla de granos SP con granos gruesos de dominio magnético sencillo estable y/o granos gruesos multidominio (MD); en las muestras con valores dentro de este intervalo se comprueba presencia de minerales ferrimagnéticos SP de tamaño de grano ultrafino (< 0.02 μm), minerales que se presentan como cristales originados por procesos bioquímicos en el suelo –pedogénesis– (Dearing, 1999), de lo que se infiere que el origen de los granos SP de estas muestras podría ser de carácter natural (partículas de polvo aerotransportadas por la acción del viento pertenecientes a suelos cercanos a los sitios donde se levantó la muestra de PU).

Discriminando los valores de la Figura 4b según su uso de suelo (Figura 4b1), tipo de vialidad (Figura 4b2) y superficie de barrido del polvo (Figura 4b3), se observan dos grupos: a) el grupo 1, con sitios dentro de la región $\chi_{FD}\% < 2\%$ y $\chi > 1 \mu m^3 \cdot kg^{-1}$; y b) el grupo 2, con valores dentro de la región $\chi_{FD}\% > 2\%$ y $\chi < 1 \mu m^3 \cdot kg^{-1}$. En el grupo 1 se encuentran la mayoría de los valores obtenidos para muestras recolectadas en las categorías de uso de suelo Industrial - Comercio y Servicios - Corredor Urbano, las clases viales Boulevard Adolfo López Mateos - Primaria - Boulevard Lázaro Cárdenas, y superficie de barrido Pavimentada; son los sitios con mayor concentración magnética relativa y con menores valores de $\chi_{FD}\%$. Muestras de sitios con valores altos de χ y de $\chi_{FD}\%$ iguales o cercanos a cero están dominadas por la abundancia de granos ferrimagnéticos de tamaño de grano magnético grueso MD, de poca o nula dependencia de la frecuencia provenientes de rocas ígneas o productos de combustión (Dearing, 1999), y que para el caso de Mexicali es poco probable tener como fuente las rocas ígneas debido a que se encuentra edificada sobre depósitos limo aluviales semiconsolidados. Al grupo 2 pertenecen la mayoría de muestras recolectadas en las categorías de uso de suelo Agropecuario - Baldío no Urbanizado - Área de Conservación, de las clases viales Rural - Sin Vialidad, caracterizadas por proceder de sitios con bajo tráfico vehicular y menor actividad humana, circunstancias que conducen a una exigua presencia de minerales ferrimagnéticos de grano grueso con débil o nula dependencia de la frecuencia en los polvos, y que se ratifica por los valores bajos de concentración magnética relativa y los valores más altos de $\chi_{FD}\%$.

Los resultados del cociente S_{200} permiten identificar de manera relativa el tipo de portador magnético presente en las muestras a través de la estimación de la coercitividad. A pesar que los valores de S_{200} van desde 0.39 hasta 1.00 (Tabla 1), en la Figura 4c se aprecia que la mayoría de valores del cociente se ubican en el intervalo de 0.8–1.0 y se distribuyen en torno a su media (0.91) y mediana (0.92), lo que señala abundancia de minerales magnéticos de relativamente baja coercitividad de tipo ferrimagnético (magnetita, maghemita y/o titanomagnetita) que dominan el comportamiento general de la mezcla heterogénea de minerales magnéticos presentes en las muestras de polvo. Dos cocientes obtenidos de los sitios 017 y 019, tienen los valores más bajos del cociente S_{200} (0.39 y 0.66, respectivamente), señalan muestras con una mayor presencia de minerales magnéticos de alta coercitividad de tipo antiferrimagnéticos (hematita y/o goetita). Muestras con valores dentro de la región $S_{200} > 0.9$ y $\chi > 1 \mu m^3 \cdot kg^{-1}$ indican una proporción más alta de minerales ferromagnéticos de

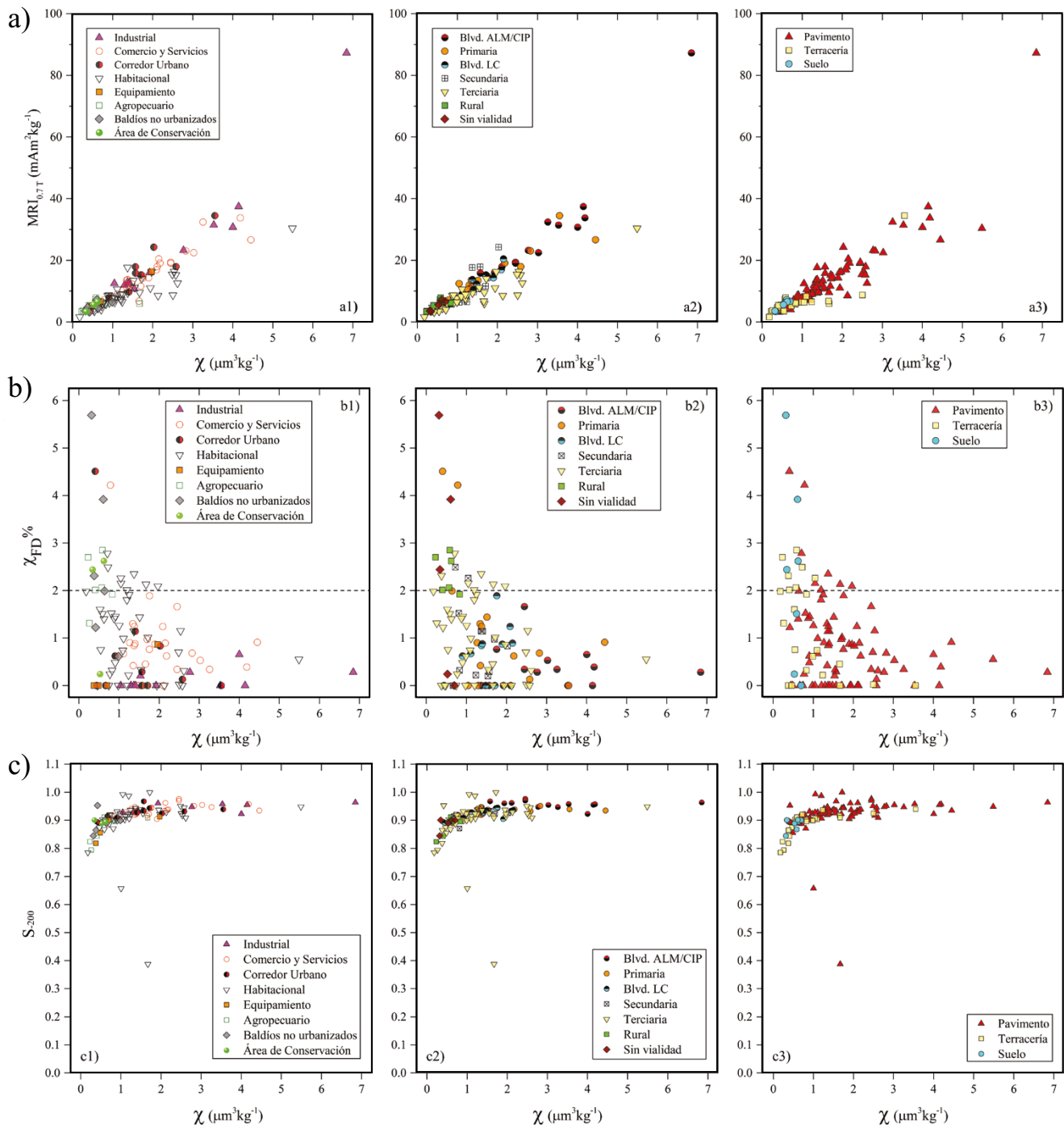


Figura 4. Diagramas de dispersión para a) MRI_{0.7T} versus χ , b) $\chi_{FD}\%$ versus χ , y c) S_{200} versus χ con discriminación de puntos según: a1-b1-c1) uso de suelo; a2-b2-c2) tipo de vialidad; a3-b3-c3) superficie de barrido del polvo.

baja coercitividad o “blandos” de origen antrópico; discriminando por factores categóricos (Tabla 2 y Figuras 4c-1,2,3), claramente se observa la siguiente asociación de características de los sitios de muestreo dentro de la región mencionada: a) uso de suelo Industrial - Comercio y Servicios - Corredor Urbano - Habitacional (Figura 4c1); b) clase de vialidad Boulevard Adolfo López Mateos - Primaria - Boulevard Lázaro Cárdenas - Secundaria (Figura 4c2); superficie de barrido Pavimentada (Figura 4c3). Muestras con valores dentro de la región $S_{200} < 0.9$ y $\chi < 1 \mu\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ indican menor presencia de minerales ferrimagnéticos

de origen antrópico, dictamen que es respaldado por las características de los sitios de muestreo (Tabla 2 y Figura 4c-1,2,3), que a pesar de las leves variaciones parámetro tras parámetro se reafirman, y que son señaladas a continuación: a) uso de suelo Agropecuario - Área de Conservación - Baldío no Urbanizado - Equipamiento (Figura 4c1); b) clase de vialidad Rural - Terciaria - Sin Vialidad (Figura 4c2); c) superficie de barrido No Pavimentada - Suelo (Figura 4c3).

Las curvas κ -T de sitios seleccionados y representativos de algunas categorías de uso de suelo y clases de vialidad se presentan en

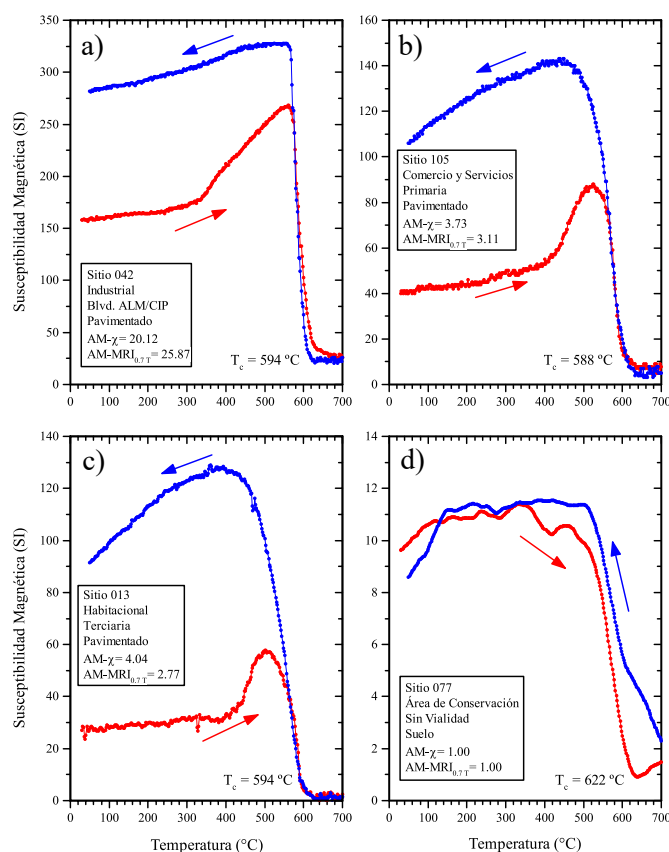


Figura 5. Curvas κ -T de muestras seleccionadas de diferente aumento magnético, según los cálculos de los valores de $AM-\chi$ y $AM-MRI_{0.7T}$, pertenecientes a diversas categorías de uso de suelo, clases de vialidad y superficies de barrido del polvo. a) Aumento magnético alto, b) y c) aumento magnético intermedio y d) sin aumento magnético. Las líneas rojas y azules indican las curvas de calentamiento y de enfriamiento, respectivamente.

la Figura 5. Los valores más altos de susceptibilidad en las curvas de enfriamiento de las muestras tomadas de sitios con AM alto e intermedio para los parámetros χ y $MRI_{0.7T}$ (Figuras 5a, 5b, 5c), revelan un comportamiento irreversible de sus fases magnéticas; por el contrario, la curva del sitio sin aumento magnético (Figura 5d) exhibe un comportamiento relativamente reversible. En las curvas de comportamiento irreversible, se observa un aumento de la susceptibilidad magnética formando un máximo local que es seguido de un vertiginoso descenso (efecto conocido como pico de Hopkinson) antes de alcanzar la T_c . El máximo local se interpreta como el pico de Hopkinson, el cual ha sido empleado como marcador para la contaminación en suelos en estudios previos similares (Jeleńska *et al.*, 2004; Aguilar *et al.*, 2011). El pico de Hopkinson no se presenta en la muestra recolectada en el Área de Conservación (Figura 5d). La T_c para las curvas irreversibles

se sitúa alrededor de los $590^\circ C$ y confirma la presencia de magnetita no estequiométrica como la fase magnética dominante en los sitios de mayor AM. La T_c para la muestra del Área de Conservación es de $622^\circ C$, temperatura que podría marcar la presencia de maghemita como fase magnética dominante y que se encuentra dentro del intervalo de T_c reportado de 590 – $675^\circ C$ para la maghemita (Dunlop y Özdemir, 1997; Evans y Heller, 2003); además, se observa un decaimiento en la curva de calentamiento en el intervalo de 330 – $400^\circ C$ que ha sido identificado e interpretado en estudios de paleosuelos como la conversión de maghemita a hematita (Deng *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2005), lo que corroboraría la presencia de maghemita.

Se puede deducir, a partir del análisis de los diferentes parámetros magnéticos, que el origen de los minerales ferromagnéticos en los polvos urbanos recolectados en zonas con una esperada menor influencia antrópica guardan una mayor relación con procesos pedogénicos, mientras que para zonas con una fuerte influencia humana se observa una mayor señal magnética con minerales ferrimagnéticos originados en actividades antrópica. Entonces, el análisis de los diferentes parámetros magnéticos justifica el uso de la concentración relativa de minerales magnéticos en Mexicali como un indicador indirecto de la contaminación, técnica que ya ha sido empleada en otros estudios similares (Hoffmann *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2009; Qiao *et al.*, 2011).

Análisis espacial

Los mejores modelos teóricos de ajuste para los semivariogramas experimentales y los valores de los diferentes parámetros (*nugget*, *sill*, rango, proporción) que definen la varianza estructural se presentan en la Tabla 4. La varianza estructural explica la variación espacial del aumento magnético para cada parámetro evaluado. El modelo teórico Exponencial para $AM-\chi$ (Proporción=0.747; $r^2=0.874$) explica el 74.7% de la variabilidad espacial del $AM-\chi$ para la región circunscrita por los sitios de muestreo con un ajuste del 87.4% de la varianza estructural. El 25.3% de la variabilidad que no explica el modelo se denomina *nugget* o varianza no estructural, corresponde a la variabilidad espacial al azar en distancias menores a la mínima separación entre sitios de muestreo y da una idea si la separación entre puntos de muestreo fue adecuada para el estudio (Delgado *et al.*, 2011). El rango (8700 m en el modelo para $AM-\chi$) es la separación entre sitios a partir de la cual el modelo no puede explicar la variabilidad espacial. El coeficiente de correlación de la validación cruzada evalúa los valores observados del AM y los valores estimados por la interpolación en cada sitio de muestreo. Los resultados obtenidos para los modelos son aceptables puesto que: a) la proporción de la varianza estructural/*sill* es mayor a 0.7; b) el coeficiente de determinación de los modelos es superior a 0.8; c) los valores de la suma de cuadrados residuales (RSS) son muy bajos. En síntesis, se exploró y comprendió mejor la relación espacial del AM ($AM-\chi$, $AM-MRI_{0.7T}$) a partir de los sitios con información conocida, y se obtuvo la mejor estimación del AM en sitios donde no se tiene información empleando la técnica de interpolación Kriging ordinario, para finalmente generar mapas del AM para la ciudad de Mexicali. La información que contiene cada mapa cubre una superficie

Tabla 4. Modelos teóricos seleccionados de mejor ajuste a los semivariogramas experimentales.

Variable	Transformación de datos	Modelo ^a	Nugget	Sill	Prop. ^b	Rango (m)	r^2 ^c	SCE ^d	r_{vc} ^e
$AM-\chi$	Log10 (desplazamiento=0)	Exponencial	0.150	0.592	0.747	8,700	0.874	0.028	0.336
$AM-MRI_{0.7T}$	Log10 (desplazamiento=0)	Exponencial	0.121	0.482	0.749	5,670	0.822	0.005	0.290

^aSemivariograma Isotrópico. ^bProporción= Varianza Estructural/Sill. ^cCoeficiente de determinación para el modelo. ^dSuma de Cuadrados del Error. ^eCoeficiente de correlación para la validación cruzada.

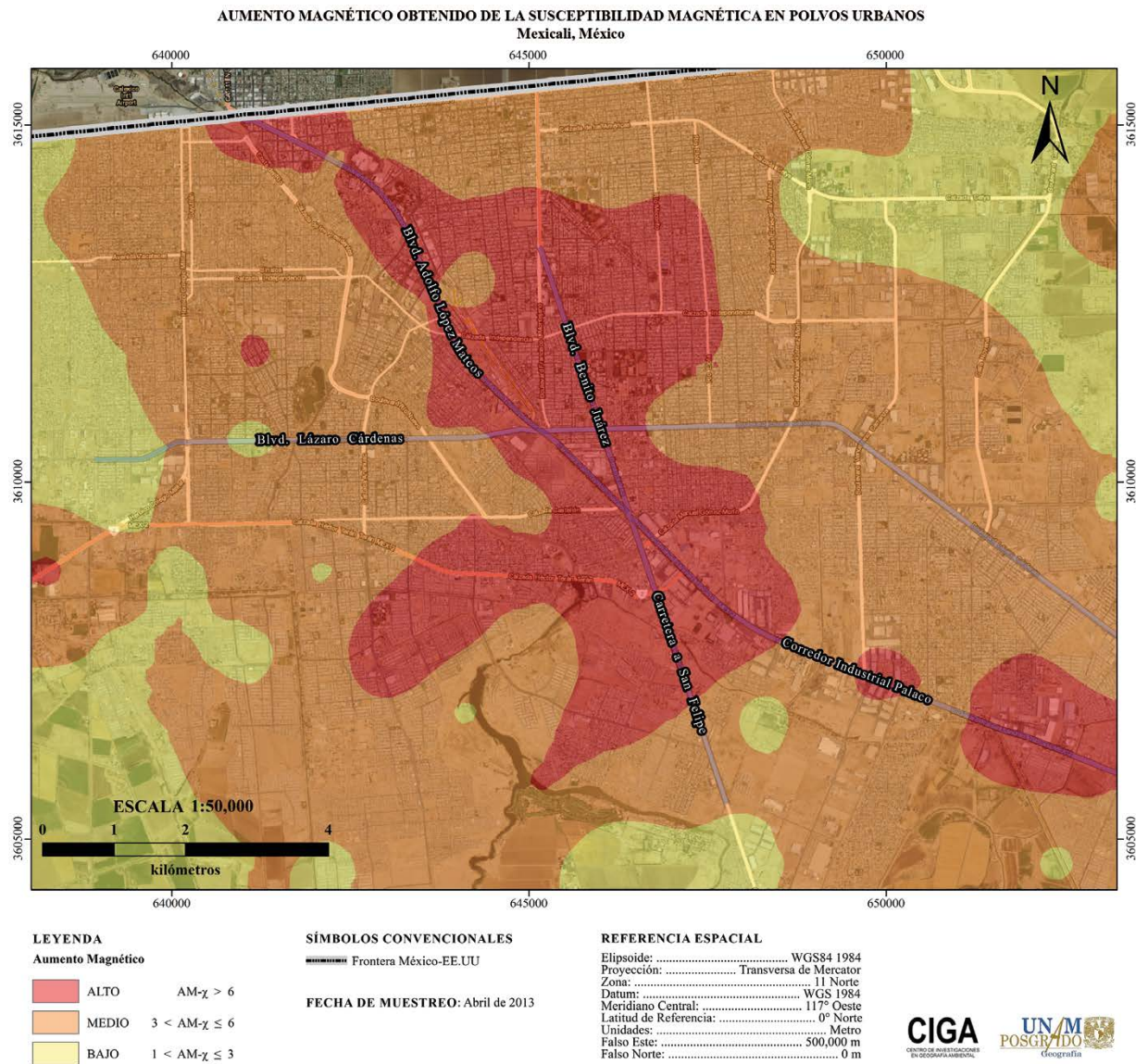


Figura 6. Mapa de distribución espacial del $AM-\chi$ para la ciudad de Mexicali.

aproximada de 170 km² del área urbana y periurbana de la ciudad.

El mapa de $AM-\chi$ (Figura 6) muestra una zonificación general del AM para la ciudad de Mexicali. Se observa una gran zona de la ciudad (de aproximadamente 31 km²) junto con una de tamaño intermedio (de unos 3.5 km²) y tres pequeñas (que suman unos 0.75 km²) categorizadas como de AM alto ($AM > 6$, color rojo en Figura 6), resultado de la detección de una mayor concentración magnética relativa evaluada a través del parámetro χ . Las zonas con $AM-\chi$ alto de mayor tamaño, engloban áreas de la ciudad caracterizadas por una presencia alta de vías de alto tráfico vehicular (vialidades Troncales, Primarias y Secundarias) y una gran variedad de usos de suelo (principalmente Habitacional, Industrial, Comercio y Servicios, Equipamiento, Corredor Urbano). También se observa que las Troncales Boulevard Adolfo López Mateos y Boulevard Benito Juárez, que incluye la sección inicial de la carretera a San Felipe, se constituyen en los ejes principales que definen la forma y orientación de dichas zonas de color rojo en la Figura 6, señalando que quizás los valores mayores de AM se deban a una mayor intensidad del tráfico vehicular sumado a la presencia de

vehículos de carga tipo diésel con un mayor número de ejes. Se infiere que las tres zonas pequeñas con $AM-\chi$ alto corresponden a sitios con contaminación de carácter puntual, dado que el análisis de la estructura de la semivarianza y la posterior interpolación tipo Kriging ordinario del mejor modelo de ajuste obtenido han demostrado que el valor del $AM-\chi$ obtenido en las muestras de esos sitios no se relaciona, espacialmente hablando, con los valores encontrados en los sitios de muestreo más próximos. El mapa no presenta zonas categorizadas como “sin aumento magnético” ($AM \leq 1$), pero si muestra que las zonas con AM bajo ($1 < AM \leq 3$) corresponden a áreas de la ciudad con vialidades Terciarias - Rurales de bajo tráfico y con los siguientes usos de suelo: a) áreas Habitacionales de la periferia de la ciudad del Nororiente y Noroccidente; b) áreas Agropecuarias del Suroriente; c) Baldíos no Urbanizados del Sur y Nororiente; y d) Área de Conservación del Nororiente.

El mapa de $AM-MRI_{0.7T}$ (Figura 7) delimita las zonas de AM alto ($AM > 6$, color rojo) en tres zonas de tamaño intermedio (de mayor a menor: 5.4 km², 1.6 km² y 1 km²) y una puntual (menor a

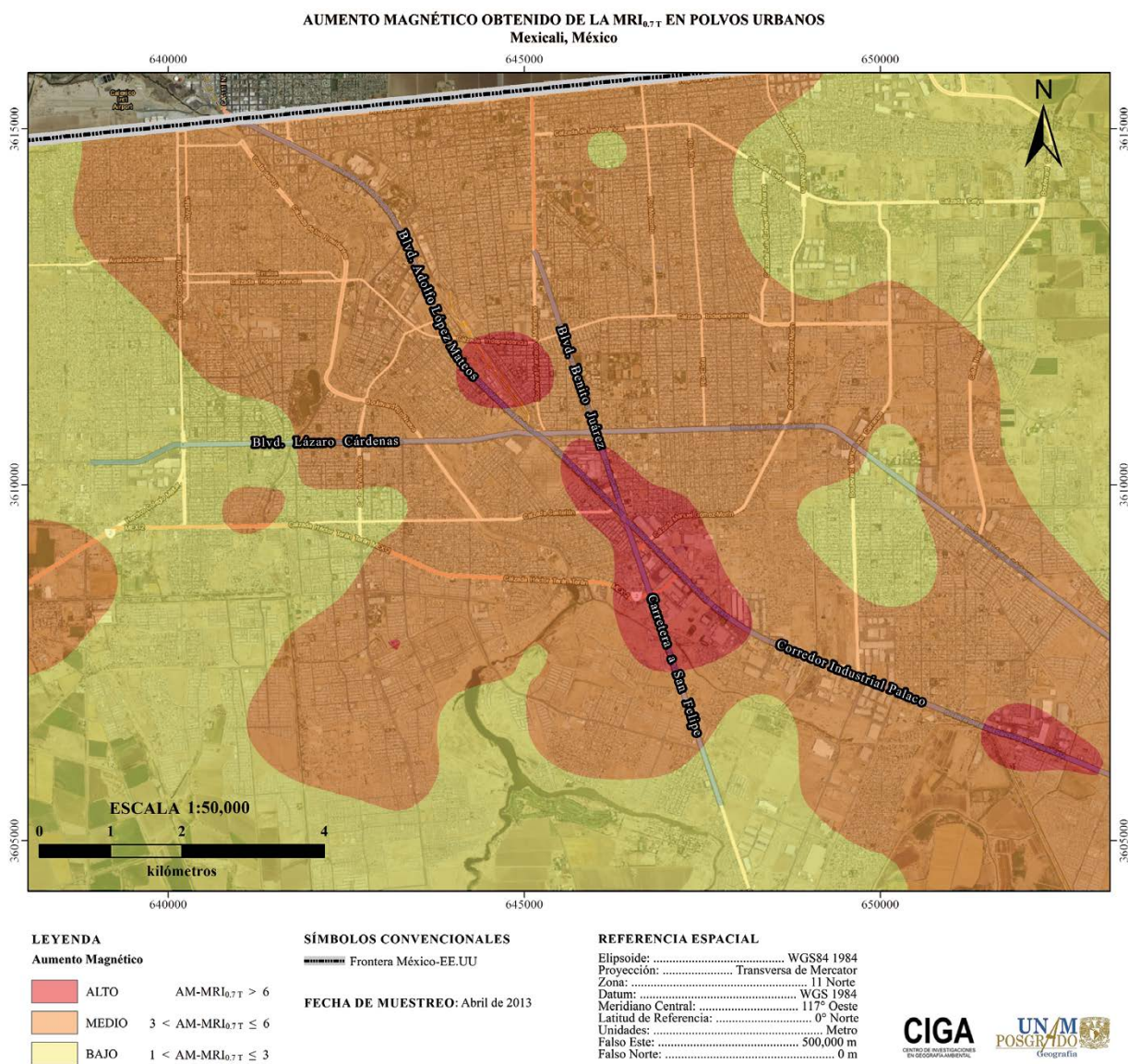


Figura 7. Mapa de distribución espacial del $AM-MRI_{0.7T}$ para la ciudad de Mexicali.

0.02 km²). Comparando esta categoría con su par del mapa de $AM-\chi$, interpretamos las zonas de tamaño intermedio como un ajuste en la resolución espacial de las zonas de mayor tamaño observadas en el mapa de $AM-\chi$, circunstancia que nos permite focalizar las áreas de la ciudad con un nivel crítico de contaminación. Las tres zonas de mayor tamaño con $AM-MRI_{0.7T}$ alto se asocian a las Troncales Boulevard Adolfo López Mateos - Boulevard Benito Juárez, y la miscelánea de usos de suelo Industrial - Comercio y Servicios - Corredores Urbanos, predominantes en las áreas, Habitacional - Equipamiento que ocupan un área menor (Figura 7). En éstas tres zonas de $AM-MRI_{0.7T}$ alto especulamos que la mayor la concentración relativa de minerales ferromagnéticos (magnetita impura) se deba a una combinación de partículas magnéticas originadas por la mayor intensidad del tráfico vehicular (como ya se discutió en la Figura 6), con partículas magnéticas de mayor densidad generadas por la actividad industrial y que debido a su peso se depositan cerca de sus fuentes de emisión. Al igual que en el mapa de la Figura 6 la zona pequeña con alto $AM-MRI_{0.7T}$ corresponde a un sitio con contaminación de carácter puntual;

tampoco se presentan zonas de la categoría “sin aumento magnético”, y la zonas con AM bajo se encuentran en la periferia de la ciudad al nororiente, occidente y suroccidente.

CONCLUSIONES

Los análisis de los diferentes parámetros magnéticos del polvo urbano demuestran que la señal magnética del Área de Conservación de donde se seleccionaron los valores de fondo para determinar el aumento magnético es dominada por la presencia de minerales ferromagnéticos tipo maghemita. Para los sitios donde se presenta aumento magnético se determinó que la señal magnética es dominada por la magnetita no estequiométrica de grano grueso con origen antrópico esencialmente producto de la combustión.

Los mapas geoestadísticos revelan que en toda la superficie ocupada por la ciudad de Mexicali existe algún nivel de contaminación, niveles definidos a través de las clases de aumento magnético bajo –

medio - alto. El nivel más alto se presenta en aquellas áreas de la ciudad donde se observa una combinación entre la gran densidad de vialidades Troncales que generan un fuerte tráfico vehicular y la predominancia de las categorías de uso de suelo Industrial - Corredor Urbano - Comercio y Servicios. Consideramos que el aumento magnético es exclusivamente antrópico debido a que la contribución litogénica es despreciable (p.ej. piroclastos de caída de origen volcánico, rocas ígneas, etc.) y su principal fuente de origen a lo ancho de la ciudad es la intensidad del tráfico vehicular, con un consecuente incremento de la acción mecánica de los vehículos sobre vialidades y generación de gases de combustión, que se ve realizada en ciertas áreas por contribuciones locales generadas por la actividad industrial. El mapa de AM-MRI_{0.7T} presenta las áreas de la ciudad con el nivel más crítico de contaminación donde se deberían tomar acciones tendientes a la remediación del problema.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico al proyecto clave CB-2011-01-169915. Francisco Bautista agradece el apoyo económico de la DGAPA-UNAM para su estancia sabática en el CEBAS-CSIC, España.

REFERENCIAS

- Aguilar, B.O., Bautista, F., Gogichaishvili, A., Morton, O., 2011, Magnetic monitoring of top soils of Merida (Southern Mexico): *Studia Geophysica et Geodaetica*, 55(2), 377-388.
- Aguilar, B.O., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., Morales, J.J., Julio, J., Quintana, P., Carvallo, C., Battu, J., 2013a, Rock-magnetic properties of topsoils and urban dust from Morelia (>800,000 inhabitants), Mexico: Implications for anthropogenic pollution monitoring in Mexico's medium size cities: *Geofísica internacional*, 52(2), 121-133.
- Aguilar, B.O., Mejía, V., Goguitchaichvili, A., Escobar, J., Bayona, G., Bautista, F., Morales, J.J., Ihl, T.J., 2013b, Reconnaissance environmental magnetic study of urban soils, dust and leaves from Bogotá, Colombia: *Studia Geophysica et Geodaetica*, 57(4), 741-754.
- Amato, F., Pandolfi, M., Alastuey, A., Lozano, A., Contreras González, J., Querol, X., 2013a, Impact of traffic intensity and pavement aggregate size on road dust particles loading: *Atmospheric Environment*, 77, 711-717.
- Amato, F., Schaap, M., Denier van der Gon, H.A.C., Pandolfi, M., Alastuey, A., Keuken, M., Querol, X., 2013b, Short-term variability of mineral dust, metals and carbon emission from road dust resuspension: *Atmospheric Environment*, 74, 134-140.
- Amato, F., Cassee, F.R., Denier van der Gon, H.A.C., Allmendinger, R.W., Gustafsson, M., Hafner, W., Harrison, R.M., Jozwicka, M., Kelly, F.J., Moreno, T., Prevot, A.S.H., Schaap, M., Sunyer, J., Querol, X., 2014, Urban air quality: The challenge of traffic non-exhaust emissions: *Journal of Hazardous Materials*, 275, 31-36.
- Bautista, F., Cram, S., Sommer, I., 2011, Suelos, *en* Bautista, F., Palacio, J.L., Delfin, H. (eds.), *Técnicas de muestreo para el estudio del manejo de recursos naturales y el cuidado del ambiente: México D.F.*, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, 227-258.
- Chow, J.C., Watson, J.G., Hampden, K., Etyemezian, V., Lowenthal, D.H., Crow, D., Kohl, S.D., Engelbrecht, J.P., Green, M.C., 2004, Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study: *Chemosphere*, 54(2), 185-208.
- Crosby, C.J., Fullen, M.A., Booth, C.A., Searle, D.E., 2014, A dynamic approach to urban road deposited sediment pollution monitoring (Marylebone Road, London, UK): *Journal of Applied Geophysics*, 105, 10-20.
- Dearing, J.A., 1999, Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2 System: British Library Cataloguing in Publication data, 54 pp.
- Dearing, J.A., Dann, R.J.L., Hay, K., Lees, J.A., Loveland, P.J., Maher, B.A., O'Grady, K., 1996, Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials: *Geophysical Journal International*, 124(1), 228-240.
- Delgado, C., Pacheco, J., Cabrera, A., Batllori, E., Orellana, R., Bautista, F., 2010, Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: The case of Yucatán, Mexico: *Agricultural Water Management*, 97(10), 1423-1433.
- Delgado, C., Bautista, F., Orellana, R., Reyes, H., 2011, Classification and agroclimatic zoning using the relationship between precipitation and evapotranspiration in the state of Yucatán, Mexico: *Investigaciones Geográficas*, 75, 51-60.
- Deng, C., Vidic, N.J., Verosub, K.L., Singer, M.J., Liu, Q., Shaw, J., Zhu, R., 2005, Mineral magnetic variation of the Jiaodao Chinese loess/paleosol sequence and its bearing on long-term climatic variability: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B3), B03103.
- Dunlop, D.J., Özdemir, O., 1997, *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*: New York, Cambridge University Press, 596 pp.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute), 2005, ArcGIS Desktop, ver. 9.1: Redlands, USA, Environmental Systems Research Institute, Inc.
- Evans, M.E., Heller, F., 2003, *Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics*: Academic Press, 317 pp.
- Gamma Design Software, 2013, GS+ Geoestatics for the Environmental Sciences, ver. 9.0: Plainwell, Michigan, USA, Gamma Design Software, LLC.
- Hoffmann, V., Knab, M., Appel, E., 1999, Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution: *Journal of Geochemical Exploration*, 66(1-2), 313-326.
- Ho, K.F., Lee, S.C., Chow, J.C., Watson, J.G., 2003, Characterization of PM10 and PM2.5 source profiles for fugitive dust in Hong Kong: *Atmospheric Environment*, 37(8), 1023-1032.
- IMIP (Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Mexicali), 2014, Mexicali en Números. Antecedentes históricos y geográficos de la ciudad de Mexicali y su valle (en línea): <<http://imipmexicali.org.mx/mexicali-numeros>>, consulta: 20 de agosto de 2014.
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), 2012, Sistema de Consulta de Indicadores de Calidad del Aire. Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional (en línea): <http://200.33.112.227/magic/calair/null/_framework>, consulta: 12 de diciembre de 2012.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2012, Zonas Metropolitanas en los Estados Unidos Mexicanos: Instituto Nacional de Estadística y Geografía - México, Censos Económicos (2009), 113 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2014, Mapa Digital de México V6 (en línea): <<http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>>, consulta: 21 de agosto de 2014.
- IARC (International Agency for Research on Cancer), 2013, Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths: Lyon/Geneva, International Agency for Research on Cancer of the World Health Organization, Press Release 221, 4 pp.
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., 1990, *An Introduction to Applied Geostatistics*: Oxford University Press, USA, 592 pp.
- Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kopcewicz, B., Sukhorada, A., Tyamina, K., Kądziałko-Hofmokl, M., Matviishina, Z., 2004, Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine: *Geophysical Journal International*, 159(1), 104-116.
- Jordanova, D., Jordanova, N., Lanos, P., Petrov, P., Tsacheva, T., 2012, Magnetism of outdoor and indoor settled dust and its utilization as a tool for revealing the effect of elevated particulate air pollution on cardiovascular mortality: *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 13, Q08Z49.
- Jordanova, D., Jordanova, N., Petrov, P., 2014, Magnetic susceptibility of road deposited sediments at a national scale - Relation to population size and urban pollution: *Environmental Pollution*, 189, 239-251.
- Kim, W., Doh, S.J., Yu, Y., 2009, Anthropogenic contribution of magnetic particulates in urban roadside dust: *Atmospheric Environment*, 43(19), 3137-3144.
- Kruskal, W.H., Wallis, W.A., 1952, Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis: *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583-621.
- Lecoanet, H., Léveque, F., Ambrosi, J.-P., 2003, Combination of magnetic parameters: an efficient way to discriminate soil-contamination sources (south France): *Environmental Pollution*, 122(2), 229-234.
- Liu, Q., Deng, C., Yu, Y., Torrent, J., Jackson, M.J., Banerjee, S.K., Zhu, R.,

- 2005, Temperature dependence of magnetic susceptibility in an argon environment: implications for pedogenesis of Chinese loess/palaeosols: *Geophysical Journal International*, 161(1), 102-112.
- Liu, Q., Roberts, A.P., Larrasoña, J.C., Banerjee, S.K., Guyodo, Y., Tauxe, L., Oldfield, F., 2012, *Environmental magnetism: Principles and applications: Reviews of Geophysics*, 50(4), RG4002.
- Maher, B.A., Thompson, R. (Eds.), 1999, *Quaternary climates, environments and magnetism*: Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press, 402 pp.
- Meza, L.M., Quintero, M., García, R., Ramírez, J., 2010, Estimación de Factores de Emisión de PM10 y PM2.5, en *Vías Urbanas en Mexicali*, Baja California, México: *Información Tecnológica*, 21(4), 45-56.
- Mmolawa, K.B., Likuku, A.S., Gaboutloeloe, G.K., 2011, Assessment of heavy metal pollution in soils along major roadside areas in Botswana: *African Journal of Environmental Science and Technology*, 5(3), 186-196.
- Osornio-Vargas, A.R., Serrano, J., Rojas-Bracho, L., Miranda, J., García-Cuellar, C., Reyna, M.A., Flores, G., Zuk, M., Quintero, M., Vázquez, I., Sánchez-Pérez, Y., López, T., Rosas, I., 2011, In vitro biological effects of airborne PM2.5 and PM10 from a semi-desert city on the Mexico-US border: *Chemosphere*, 83(4), 618-626.
- Plumlee, G.S., Ziegler, T.L., 2003, *The Medical Geochemistry of Dusts, Soils, and Other Earth Materials*, en Sherwood Lollar, B. (ed.), *Treatise on Geochemistry*: Oxford, Pergamon, 263-310.
- Qiao, Q., Zhang, C., Huang, B., Piper, J.D.A., 2011, Evaluating the environmental quality impact of the 2008 Beijing Olympic Games: magnetic monitoring of street dust in Beijing Olympic Park: *Geophysical Journal International*, 187(3), 1222-1236.
- SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social), USTRAN (Urbanismo y Sistemas de Transporte S.A. de C.V.), LOGIT (Logística Informática y Transporte S.A. de C.V.), Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Mexicali (IMIP), 2011a, *Plan Maestro de Vialidad y Transporte para el Municipio de Mexicali*: Periódico Oficial del Estado de Baja California, 296.
- SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social), USTRAN (Urbanismo y Sistemas de Transporte S.A. de C.V.), LOGIT (Logística Informática y Transporte S.A. de C.V.), IMIP (Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Mexicali), 2011b, *Usos del Suelo Área Urbana D-SU1 Plano 3, escala 1:100000*: Mexicali, Baja California, México, Periódico Oficial del Estado de Baja California *Plan Maestro de Vialidad y Transporte para el Municipio de Mexicali*, B. C. 1 mapa.
- SSA (Secretaría de Salud), 2014, *Norma Oficial Mexicana, Salud ambiental, NOM-025-SSA1-2014, Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación*. (en línea): <http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014>, consulta: 2 de octubre de 2014.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional), 2014, *Normales Climatológicas 1951-2010, Estación: 00002033 MEXICALI (DGE)* (en línea): <http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75>, consulta: 20 de agosto de 2014.
- Shilton, V.F., Booth, C.A., Smith, J.P., Giess, P., Mitchell, D.J., Williams, C.D., 2005, *Magnetic properties of urban street dust and their relationship with organic matter content in the West Midlands, UK*: *Atmospheric Environment*, 39(20), 3651-3659.
- Tauxe, L., 1998, *Paleomagnetic Principles and Practice*: New York, Springer, 300 pp.
- Terán, L.A., Peña, J.L., Contreras, V., García, R., 2003, *Carta Geológico-Minera, Mexicali I11-12, Baja California y Sonora, escala 1:250,000*: Pachuca, Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano (SGM).
- Thompson, R., Oldfield, F., 1986, *Environmental Magnetism*: London, Allen and Unwin, 227 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(1-4), 566-575.
- Vega, E., Mugica, V., Reyes, E., Sánchez, G., Chow, J.C., Watson, J.G., 2001, Chemical composition of fugitive dust emitters in Mexico City: *Atmospheric Environment*, 35(23), 4033-4039.
- Watson, J.G., Chow, J.C., 2001, Source characterization of major emission sources in the Imperial and Mexicali Valleys along the US/Mexico border: *Science of The Total Environment*, 276(1-3), 33-47.
- Webster, R., Oliver, M.A., 1990, *Statistical methods in soil and land resource survey*: New York, Oxford University Press, 316 pp.
- WHO (World Health Organization), 2006a, *Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution*: Copenhagen Ø, Denmark, World Health Organization Regional Office for Europe, 144 pp.
- WHO (World Health Organization), 2006b, *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment*: Copenhagen Ø, Denmark, World Health Organization Regional Office for Europe, 22 pp.
- WHO (World Health Organization), 2011, *Urban outdoor air pollution database* (en línea): <http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/>, consulta: 10 de septiembre de 2012.
- WHO (World Health Organization), 2014, *7 million premature deaths annually linked to air pollution* (en línea): <<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>>, consulta: 15 de agosto de 2014.
- Xia, D., Wang, B., Yu, Y., Jia, J., Nie, Y., Wang, X., Xu, S., 2014, Combination of magnetic parameters and heavy metals to discriminate soil-contamination sources in Yinchuan — A typical oasis city of Northwestern China: *Science of The Total Environment*, 485-486, 83-92.

Manuscrito recibido: Febrero 1, 2015

Manuscrito corregido recibido: Julio 29, 2015

Manuscrito aceptado: Agosto 6, 2015