



## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA ESPECÍFICA A LO LARGO DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE GUADALAJARA

L. Peña<sup>1</sup>, F. Bautista<sup>2,3\*</sup>, R. Cejudo<sup>4\*</sup>, A. Goguichaisvili<sup>4</sup>, J. Morales<sup>4</sup>, Jose Rosas<sup>5</sup>, Roberto Maciel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, UG, Guadalajara, México.

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, CIGA-UNAM, Morelia, México.

<sup>3</sup> Centro de Edafología y Biología Aplicada de Segura-CSIC, Murcia, España.

<sup>4</sup> Instituto de Geofísica Unidad Michoacán, LUGA-UNAM, Morelia, México.

<sup>5</sup> Centro Universitario de los Valles, UG, Ameca, México

\* e-mail: ruben@geofisica.unam.mx

### ABSTRACT

Recent investigations using non-conventional and non-destructive (magnetic and chromatographic) methods clearly demonstrated the feasibility to determine the spatial distribution of some potentially toxic elements. The main purpose of this study was the estimation of relatively polluted zones by potentially toxic elements through the mass specific susceptibility ( $\chi_{rf}$ ) along the The Guadalajara Metropolitan Area (GMA). In total 404 samples were collected (149 of topsoils, 104 of urban dust and 151 of leaves). Several geospatial representations of  $\chi_{rf}$  distribution were merged in order to obtain better accuracy. This preliminary investigation allowed the identification of seven zones in the GMA area with relatively high content of toxic elements.

**Keywords:** Mass specific susceptibility, Potentially toxic elements, Monitoring

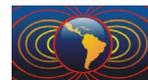
### RESUMEN

Estudios realizados con técnicas no convencionales y no destructivas (magnéticas o cromatografía) muestran la posibilidad de determinar indirectamente la concentración de ciertos elementos potencialmente tóxicos. El propósito de este estudio fue determinar zonas contaminadas por elementos tóxicos de forma indirecta a través de la distribución espacial de valores de susceptibilidad magnética másica ( $\chi_{rf}$ ) de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) en tres diferentes tipos de muestras. Se recolectaron 404 muestras (149 de suelo, 104 de polvo urbano y 151 de hoja) de la ZMG el 27 marzo de 2013. Las tres representaciones geoespaciales de la distribución de valores de  $\chi_{rf}$  fueron fusionadas para determinar con mejor precisión las zonas contaminadas. Se logró identificar siete zonas en la ZMG que, probablemente, contienen altas concentraciones de elementos tóxicos.

**Palabras Clave:** Susceptibilidad magnética másica, Elementos potencialmente tóxicos, Monitoreo

### Introducción

Los diagnósticos y evaluaciones de zonas o sitios contaminados por elementos tóxicos son estudios costosos y requieren de mucho tiempo para realizarse. Actualmente, las técnicas convencionales más empleadas (absorción atómica, fluorescencia de rayos X o ICP-masa) requieren de insumos y un manejo especial para cada tipo de muestras; esto hace que los costos de cada análisis se incrementen considerablemente. Una alternativa para minimizar los costos de los estudios de concentración de elementos tóxicos en suelo, polvo y plantas es a través del empleo de técnicas no convencionales y no destructivas (estudios magnéticos o cromatografía). Estas técnicas son capaces de determinar la concentración de ciertos elementos tóxicos



de forma indirecta y en tiempos más cortos, además de que se pueden analizar una gran cantidad y variedad de muestras (Morton-Bermea *et al.*, 2009; Guzmán-Morales *et al.*, 2011; Bautista *et al.*, 2014; Cejudo *et al.*, 2015). Los resultados obtenidos por estas técnicas no convencionales presentan un grado de confiabilidad aceptable para determinar la concentración de elementos tóxicos (Morton-Bermea *et al.*, 2009; Xia *et al.*, 2014, Cejudo *et al.*, 2015). En diferentes ciudades de México, donde se han empleado diversos tipos de muestras ambientales (suelo, polvo urbano o planta), y en diferentes tipos de ambientes geológicos (volcánicos, lacustres, kársticos, etc), se ha demostrado la eficacia de los parámetros magnéticos (susceptibilidad magnética másica y volumétrica, magnetización remanente isothermal, entre otros) para determinar la concentración de ciertos elementos tóxicos, tales como: Cr, Cu, V, Pb y Zn (correlaciones lineales y/o múltiples  $> 0.3$ ). Muchos trabajos en México han realizado una representación geoespacial de los valores de los parámetros magnéticos para identificar zonas presuntamente contaminadas (Morton-Bermea *et al.*, 2009, 2012; Cejudo *et al.*, 2015). Estos trabajos comúnmente emplean un solo tipo de muestra ambiental para dar resultados aproximados de zonas contaminadas. Sin embargo, los factores ambientales pueden afectar dichos resultados, así como la interpretación de estas zonas. Una alternativa es el empleo de dos o más tipos de muestras ambientales para obtener un mejor resultado y poder identificar con precisión estas zonas contaminadas.

El propósito de este estudio fue determinar zonas contaminadas por elementos tóxicos de forma indirecta a través de la distribución espacial de valores de susceptibilidad magnética másica ( $\chi_{mf}$ ) de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) en tres diferentes tipos de muestras con la finalidad de identificar correctamente áreas presuntamente contaminadas.

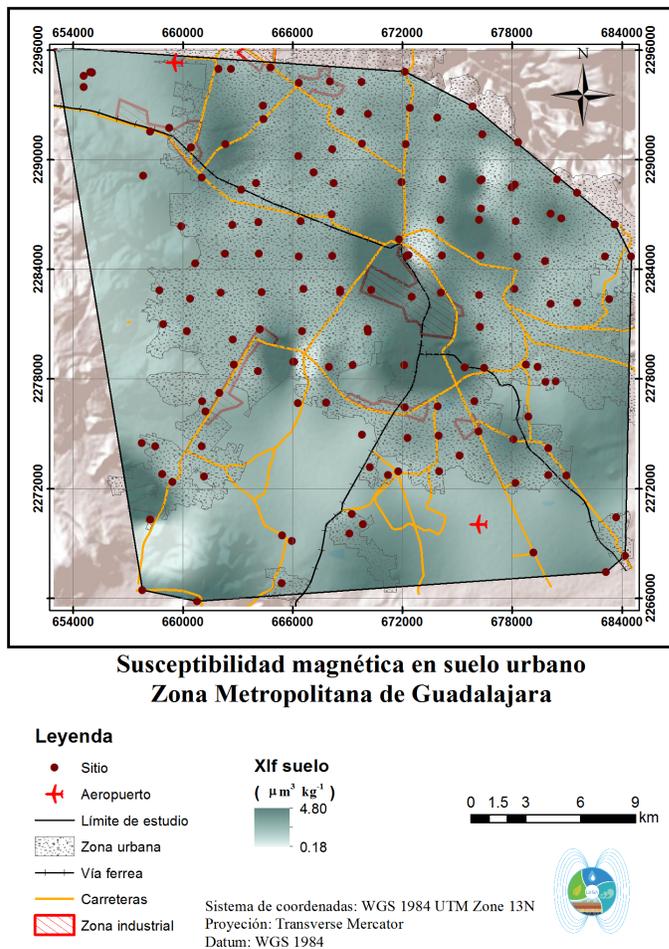
### Metodología

Se realizó un levantamiento de 404 muestras ambientales (149 de suelo, 104 de polvo urbano y 151 de hojas) en un polígono de 777 km<sup>2</sup> que cubre la ZMG en 2013. En esta área metropolitana viven 4,063,696 personas (INEGI, 2010). La muestra de suelo fue recolectada con un nucleador plástico de 100 mL, el cual se introdujo en el suelo a una profundidad de 5 cm; el material obtenido fue colocado en una bolsa de polipropileno con cierre. La muestra de polvo urbano estuvo constituida del material que se barrió en un área de un metro cuadrado. Este material fue recolectado con un recogedor de papel y brochas para evitar su contaminación; posteriormente fue colocado en una bolsa de polipropileno con cierre. La muestra de hojas estuvieron constituidas por 30 hojas maduras de *Ficus sp.*; estas hojas se encontraban a una altura entre 1.5 y 2 m. Todas las muestras fueron georeferenciadas. En el laboratorio, las muestras de suelo y polvo fueron secadas a la sombra a temperatura ambiente por dos semanas, posteriormente, se tamizó el material en malla N°10. El material obtenido fue encapsulado en cajas de acrílico de 8 cm<sup>3</sup> para realizar mediciones magnéticas. Por otra parte, las hojas secas fueron trituradas y colocadas dentro de cajas de acrílico de 8 cm<sup>3</sup> para realizar mediciones magnéticas; todas las muestras fueron pesadas en el laboratorio. La susceptibilidad magnética ( $\kappa$ ) fue medida en un equipo Bartington MS3 a una frecuencia de 0.46 kHz. Con los resultados se determinó la susceptibilidad magnética másica ( $\chi_{mf} = \kappa/\rho$ ,  $\rho$  es la densidad,  $\rho = \text{masa/volumen en kg m}^{-3}$ ). El análisis geoestadístico y la representación cartográfica de los datos fueron hechos por medio del software Arcgis 10, en el sistema de proyección de coordenadas UTM WGS84 zona 13N. Para cada tipo de muestra ambiental se realizó una interpolación de tipo Spline Tensión la cual minimiza y suaviza la curvatura de la superficie en cada punto de entrada (Mitas, Mitsova 1999; Sáenz *et al.*, 2012; ESRI, 2015). En cada representación geoespacial los datos se clasificaron en cuatro zonas para agrupar los datos de  $\chi_{mf}$  en baja, media, alta y muy alta probabilidad de encontrar zonas potencialmente contaminadas.



## Resultados

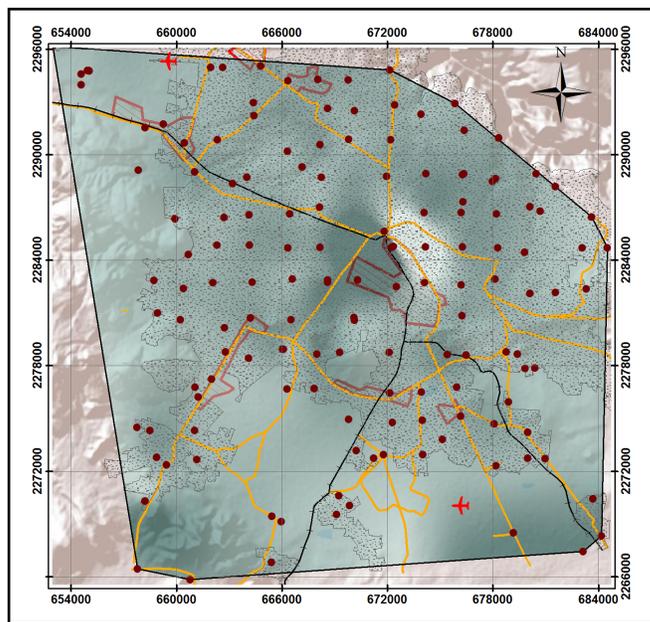
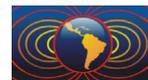
Los resultados de  $\chi_{if}$  para suelo urbanos presentaron valores entre 0.18 a  $4.80 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ , con valor promedio de  $1.18 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$  y  $\sigma$  de  $0.75 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ . La representación geoespacial de  $\chi_{if}$  para suelos urbanos mostró que los valores más altos ( $>1.42 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ ) se presentan cerca de las zonas industriales, en cruces de avenidas principales con cruces de vía férrea e intersecciones de caminos, zonas que están en la parte central, noroeste y sureste de ZMG (Fig. 1).



**Figura 1.** Mapa de interpolación Spline para  $\chi_{if}$  medida en suelo urbano de la Zona Metropolitana de Guadalajara.

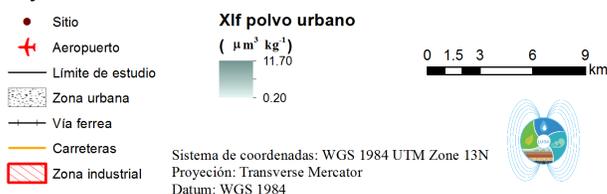
Los resultados de  $\chi_{if}$  para polvo urbano mostraron valores entre 0.2 a  $11.7 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ , un valor promedio de  $2.28 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$  y un valor de  $\sigma$  de  $1.9 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ . La representación geoespacial de  $\chi_{if}$  para polvo urbano mostró que los valores más altos ( $> 3.29 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ ) se encontraron, principalmente, en la parte central de la ZMG y en zonas muy cercanas al área industrial. Por otra parte, los valores más bajos de  $\chi_{if}$  ( $< 1.00 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ ) se presentan muy cerca de los valores altos, por lo que, muy probablemente, los factores ambientales estén jugando un papel importante en la distribución del polvo (Fig. 2).

Los resultados en hojas de *Ficus sp.*, presentaron valores entre 0 a  $3.06 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ , un valor promedio de  $0.55 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$  y un valor de  $\sigma$  de  $0.60 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ . La representación geoespacial de  $\chi_{if}$  para plantas mostró que los valores más altos ( $>0.63 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ ) se encontraron, principalmente, en la parte central, noroeste y sureste de la Zona Metropolitana de Guadalajara, muy próxima a las zonas industriales y cerca de los aeropuertos (Fig. 3).



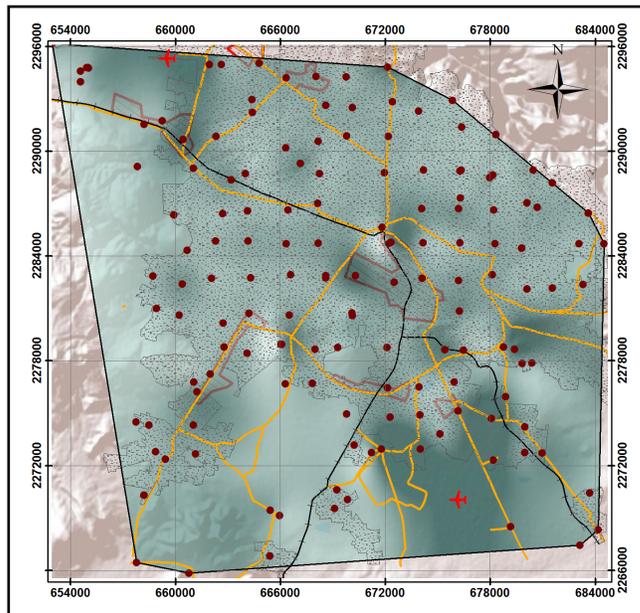
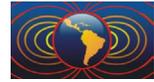
**Susceptibilidad magnética en polvo urbano  
Zona Metropolitana de Guadalajara**

**Leyenda**



**Figura 2.** Mapa de interpolación Spline para  $\chi_{if}$  medida en polvo urbano de la Zona Metropolitana de Guadalajara.

Para identificar con mejor precisión las zonas presuntamente contaminadas por elementos tóxicos a través de los valores de  $\chi_{if}$  en la ZMG, se realizó una intersección entre cada una de las representaciones espaciales de cada muestra ambiental (suelo urbano, polvo urbano y hojas de *Ficus sp.*). El procedimiento para ello fue el siguiente: cada representación geoespacial fue normalizada y clasificada en cuatro intervalos regulares; posteriormente, con estas representaciones geoespaciales, se realizó una intersección con todas las capas y se normalizaron los datos obtenidos. La nueva representación geoespacial presenta zonas de baja, media, alta y muy alta probabilidad de encontrar valores altos de  $\chi_{if}$  para suelo urbano, polvo urbano y hojas. Por lo tanto, esta representación indirectamente representa las zonas presuntamente contaminadas con una mayor precisión, ya que el resultado está en función de tres tipos de muestras envés de un solo tipo de muestra. Por medio de la representación geoespacial obtenida se encontró que existen siete áreas que muestran altos valores de  $\chi_{if}$  y que, probablemente, tienen mayor problema de contaminación por elementos potencialmente tóxicos. Estas zonas se encontraron distribuidas de la siguiente manera: tres en la parte central, una en la parte noroeste, dos en la parte sureste y una en la parte suroeste de la ZMG (Fig. 4). El área total que comprende este estudio fue de 777 km<sup>2</sup>, de la cual 2.5% mostró valores bajos de susceptibilidad y, presuntamente, no tiene problemas de contaminación por elementos tóxicos; 47.3% del área estudiada podría contener concentraciones moderadas de elementos tóxicos, mientras que 45.4% del área podría tener concentraciones altas de elementos tóxicos al registrar valores altos de susceptibilidad. El 4.8% del área estudiada presenta valores muy altos de susceptibilidad, por lo que, en estas zonas, es muy probable que las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos sean muy altas (Fig. 4).



**Susceptibilidad magnética en hojas  
Zona Metropolitana de Guadalajara**

**Leyenda**

- Sitio
- ✈ Aeropuerto
- Límite de estudio
- ▨ Zona urbana
- Via ferrea
- Carreteras
- ▨ Zona industrial

**Xlf hojas**

( $\mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ )  
3.06  
0.00

0 1.5 3 6 9 km

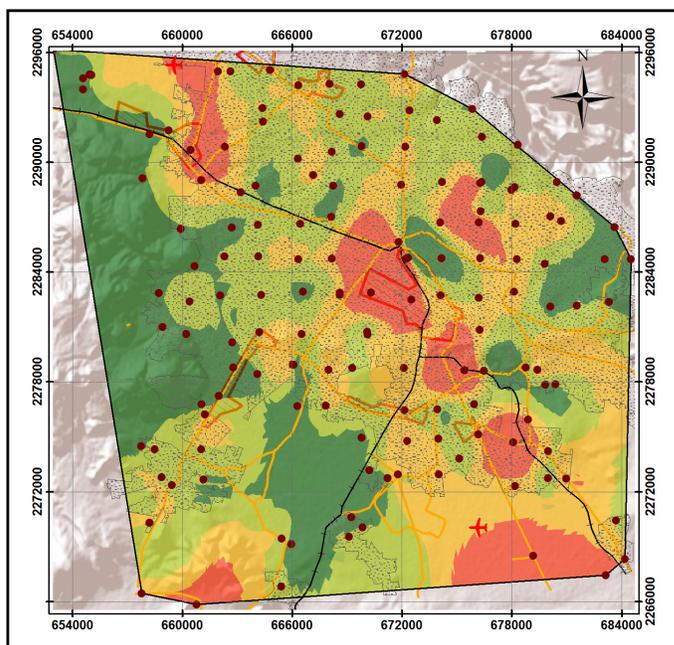
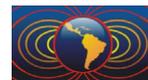
Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zone 13N  
Proyección: Transverse Mercator  
Datum: WGS 1984



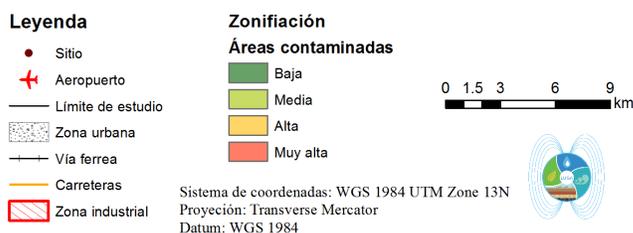
**Figura 3.** Mapa de interpolación Spline para  $\chi_{lf}$  medida en hojas de *Ficus sp.* de la Zona Metropolitana de Guadalajara.

**Conclusión**

El empleo de valores de  $\chi_{lf}$  para determinar concentraciones de elementos potencialmente tóxicos es un método de aproximación bastante rápido y eficaz. El empleo de diferentes tipos de muestras ambientales, tales como: el suelo urbano, el polvo urbano y hojas de *Ficus sp.*, así como la conjugación con los sistemas de información geográfica facilitan enormemente la identificación de áreas posiblemente contaminadas por elementos potencialmente tóxicos a través de la medición de la susceptibilidad magnética. En este estudio, se ha demostrado la posibilidad de determinar zonas presuntamente contaminadas por elementos tóxicos de forma indirecta en la Zona Metropolitana de Guadalajara a través de la susceptibilidad magnética. La identificación y delimitación de zonas que probablemente están contaminadas pueden delimitarse mejor si se manejan tres tipos de muestras ambientales en lugar de usar un solo tipo de muestra ambiental, como hasta ahora se ha venido haciendo. El empleo de esta técnica no convencional permite realizar estudios diagnósticos preliminares en un tiempo mucho más corto.



**Zonificación de áreas presuntamente contaminadas en la Zona Metropolitana de Guadalajara**



**Figura 4.** Mapa de zonificación para identificar áreas presuntamente contaminadas por elementos tóxicos en la Zona Metropolitana de Guadalajara.

**Referencias**

Bautista, F., Cejudo, R., Aguilar, B., Gogichaishvili, A., 2014. El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: una revisión. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66, 2, 365-376.

Cejudo, R., Bautista, F., Quintana, P., Delgado-Carranza, C., Aguilar, D., Goguitchaichvili, A., Morales-Contreras, J., 2015. Correlación entre elementos potencialmente tóxicos y propiedades magnéticas en suelos de la Ciudad de México para la identificación de sitios contaminados: definición de umbrales magnéticos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32, 1, 50-61.

INEGI. (28/10/2014). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 12 de 10 de 2014, información nacional por entidad federativa y municipio en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?src=487&e=9>.

ESRI. (08/07/2015) ESRI-GIS. Recuperado el 08 de 07 de 2015, Ayuda de ArcGIS 10.1, Cómo funciona Spline, <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#//009z00000078000000>

Mitas, L., Mitasova, H., 1999. Spatial interpolation in Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D., Ed. *Geographical Information System*, 1296 pp, New York, United States of America.

Morton-Bermea, O., Hernandez, E., Martinez-Pichardo, E., Soler-Arechalde, A., Lozano, R., Gonzalez-Hernandez, G., Beramendi-Orosco, L., Urrutia-Fucugauchi, J., 2009., Mexico City topsoils: Heavy metals vs. magnetic susceptibility. *Geoderma*, 151, 121-125



- Guzmán-Morales, J., Morton-Bermea, O., Hernández, E., Rodríguez, M., García, M., Tapia, V., 2011. Assessment of Atmospheric Metal Pollution in the Urban Area of Mexico City, Using *Ficus benjamina* as Biomonitor. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 86, 495–500.
- Sáenz, C., Rehfeldt, G., Crookston N., Duval P., Beaulieu J., 2012. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Michoacán state, México. Impact on the vegetation. *Revista fitotecnia mexicana*, 35, 4, 333-345
- Xia, D., Wang, B., Yu, Y., Jia, J., Niea, Y., Wang, X., Xua 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.