



## AUMENTO MAGNÉTICO EN SUELOS SUPERFICIALES DE LA CONURBACIÓN BINACIONAL MEXICALI-CALEXICO

Alexander Sánchez-Duque<sup>1,\*</sup>, Francisco Bautista<sup>1,2</sup>, Avto Gogichaishvili<sup>3</sup>, Jaime Alonso Reyes-López<sup>4</sup>, Fernando Amílcar Solís-Domínguez<sup>5</sup>, Socorro Romero-Hernández<sup>4</sup>, Aseneth Herrera-Martínez<sup>5</sup>, Israel Mateo Sánchez-Leyva<sup>5</sup>, Fredy Rubén Cejudo-Ruiz<sup>3</sup>, Juan Julio Morales-Contreras<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, México.

<sup>2</sup>Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC), Murcia, España.

<sup>3</sup>Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Instituto de Geofísica Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, México.

<sup>4</sup>Laboratorio de Ciencia y Tecnología del Agua, Suelo y Medio Ambiente, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, México.

<sup>5</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, México.

\* e-mail: [asanchezduq@gmail.com](mailto:asanchezduq@gmail.com)

### ABSTRACT

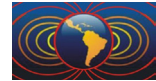
An environmental magnetism study in the binational conurbation Mexicali-Calexico was conducted to define different contamination levels through magnetic enhancement assessment in urban topsoils. 150 topsoil and 13 control soil samples, belonging to different soil groups, were collected at 150 georeferenced sites. Rock and mineral magnetic techniques consisted of systematic measurements of magnetic susceptibility; isothermal remanent magnetization (IRM) and Curie temperature ( $T_C$ ), which were conducted for identification of magnetic mineralogy and relative magnetic mineral concentration. Magnetic enhancement (ME) was calculated using IRM at 0.7 Teslas ( $IRM_{0.7T}$  parameter). Georeferenced data matrix was built and geostatistical analysis was performed to model spatial variability of ME in urban topsoils. Geostatistical analysis techniques shown to be effective to determine spatial distribution of relative magnetic mineral concentration in topsoils, assessed through ME, allowing zoning urban areas on several levels of anthropogenic contamination responsible for the magnetic increase in samples.

**Keywords:** Environmental magnetism, Geostatistics, Urban contamination, Soil groups.

### RESUMEN

Se realizó un estudio de magnetismo ambiental en la conurbación binacional Mexicali-Calexico (CBMC) para definir diferentes niveles de contaminación a través de la evaluación del aumento magnético en suelos superficiales. Se recolectaron 150 muestras de suelos superficiales y 13 muestras control de suelos, pertenecientes a diferentes grupos de suelos, en 150 sitios geo-referenciados. Fueron llevadas a cabo técnicas de magnetismo de rocas y minerales consistentes en mediciones sistemáticas de susceptibilidad magnética, magnetización remanente isotérmica (MRI) y temperatura de Curie ( $T_C$ ) para identificar la mineralogía magnética y la concentración relativa de minerales magnéticos. El aumento magnético (AM) fue calculado usando el parámetro MRI a 0.7 Teslas ( $MRI_{0.7T}$ ). Se elaboró una matriz de datos geo-referenciados y se desarrolló un análisis geoestadístico para modelar la variabilidad espacial del AM en suelos urbanos superficiales. Las técnicas de análisis geoestadístico demostraron ser efectivas para determinar la distribución espacial de la concentración relativa de minerales magnéticos en suelos superficiales, evaluada a través del AM, permitiendo zonificar las áreas urbanas en diferentes niveles de contaminación antropogénica responsable del incremento magnético en las muestras.

**Palabras Clave:** Magnetismo ambiental, Geoestadística, Contaminación urbana, Grupos de suelo.



## Introducción.

Según el informe mundial de contaminación atmosférica del año 2012 (WHO, 2011), Mexicali fue catalogada como la ciudad con el aire más contaminado de México según el parámetro de evaluación de la calidad del aire  $PM_{10}$  (partículas sólidas aerotransportadas de diámetro menor que  $10 \mu m$ ). Por tal razón se decidió realizar un levantamiento sistemático de muestras ambientales (hojas, polvos y suelos superficiales urbanos) en abril de 2013, que fue complementado con un muestreo realizado en agosto de 2013 en la ciudad vecina de Calexico (EE.UU) con el fin de realizar estudios de magnetismo ambiental y de cuantificación de elementos potencialmente tóxicos que sirvieran para modelar espacialmente la contaminación urbana. En este trabajo presentamos avances en magnetismo ambiental de suelos superficiales, como una estrategia indirecta para el análisis del problema de contaminación ambiental en la CBMC, que ha demostrado ser útil en estudios similares en México y otras ciudades del planeta (Aguilar *et al.*, 2011; Aguilar *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014).

## Metodología.

### *Área de estudio.*

Mexicali y Calexico se localizan a cada lado de la frontera México-EE.UU, edificadas sobre depósitos limo-aluviales semi-consolidados del valle de Mexicali (Imperial Valley en EE.UU); pertenecientes a la llanura deltaica salina del Río Colorado, de clima árido cálido, altitud media de 3 msnm y precipitación media anual de 74.5 mm. Los principales grupos de suelo presentes la periferia de Mexicali son Vertisol, Regosol y pequeñas áreas de Arenosol (INEGI, 2014), grupos pertenecientes a la clasificación de la “World Reference Base for Soil Resources” WRB (IUSS Working Group WRB, 2006).

### *Muestreo y preparación de muestras.*

Se realizó un muestreo sistemático de  $100 \text{ cm}^3$  de suelo superficial (profundidad: 0-5 cm) en 150 sitios geo-referenciados de la CBMC (Mexicali 110, Calexico 40). Adicionalmente, en 13 sitios de Mexicali se colectó una muestra control de suelos (profundidad: 20-25 cm). Empleando información del INEGI (2014), las 110 muestras de Mexicali fueron clasificadas por grupos de suelos de la WRB: Arenosol (1), Regosol (14), Tecnosol (66, suelos dentro del perímetro urbano), Vertisol (29). Las 40 muestras de Calexico fueron clasificadas como Tecnosoles por haber sido recolectadas dentro del perímetro urbano. Las muestras se secaron dos semanas a la sombra; posteriormente fueron molidas, tamizadas (malla plástica 18, 1 mm de abertura), en capsuladas en contenedores cúbicos de acrílico (volumen interno  $8 \text{ cm}^3$ ) y pesadas (descartando el peso del contenedor) para calcular la densidad ( $\rho$ ).

### *Mediciones magnéticas.*

Se realizaron en el Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, UNAM Campus Morelia, México. Para cada muestra se determinó: i) susceptibilidad magnética en dos frecuencias ( $\kappa_{\text{klf}}$  baja, 470 Hz;  $\kappa_{\text{hf}}$  alta, 4700 Hz) con un susceptibilímetro de frecuencia dual Bartington MS2B; ii) susceptibilidad magnética específica de masa ( $\chi = \kappa_{\text{lf}}/\rho$ ); iii) porcentaje de la susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia ( $\chi_{\text{FD}}\% = [(\kappa_{\text{lf}} - \kappa_{\text{hf}})/\kappa_{\text{lf}}] \times 100\%$ ). También se indujo una magnetización remanente isotérmica (MRI) mediante la aplicación de ocho pulsos magnéticos unidireccionales de intensidad creciente en el intervalo 0.025-0.7 Teslas, utilizando un magnetizador de pulsos ASC IM10-30, alcanzando en la  $MRI_{0.7T}$  (MRI adquirida a 0.7 Teslas) la magnetización de saturación para la mayoría de minerales magnéticos presentes. Se determinó la MRI inducida luego de cada pulso empleando un magnetómetro de giro Molspin LTD. Las curvas de adquisición MRI y el valor de  $MRI_{0.7T}$  indican la concentración relativa y el tipo de minerales magnéticos portadores de la remanencia magnética (Evans y Heller, 2003). Adquirida la  $MRI_{0.7T}$  se indujo una magnetización en dirección opuesta a la original suministrando un pulso magnético de 0.2 Teslas



( $MRI_{-0.2T}$ ) para calcular el cociente  $S_{-200}$ , ( $S_{-200} = MRI_{-0.2T} / MRI_{0.7T}$ ) útil para el análisis de la abundancia relativa de minerales antiferromagnéticos de alta coercitividad mezclados con minerales ferrimagnéticos, empleado satisfactoriamente en otros estudios de suelos superficiales (Aguilar *et al.*, 2011; Aguilar *et al.*, 2013). En muestras seleccionadas se obtuvieron curvas de variación de la susceptibilidad magnética en función de la temperatura (curvas  $\kappa$ -T), para estimar la estabilidad termomagnética y el tipo de portador magnético dominante mediante la temperatura de Curie ( $T_c$ ). Se empleó un susceptibilímetro Bartington MS2WFP equipado con horno, se calentaron progresivamente las muestras desde temperatura ambiente hasta 700 °C a una tasa de 10°C/min y se enfriaron a la misma tasa.

#### ***Análisis de datos y evaluación del aumento magnético.***

Se emplearon diagramas de cajas y bigotes para comparar estadísticamente las muestras según su procedencia (Calexico, Mexicali, muestras control de suelos -MCS-), observando semejanzas y diferencias entre sus medianas. Adicionalmente, los diagramas sirvieron para realizar gráficamente el resumen estadístico de los parámetros magnéticos determinados ( $\chi$ ,  $MRI_{0.7T}$ ,  $\chi_{FD}\%$ ,  $S_{-200}$ ). Teniendo en cuenta la clasificación según el grupo de suelos, se calculó el aumento magnético (AM) de cada muestra usando la relación  $AM = P_i / P_{vf}$ , donde  $P_i$  es el valor de  $MRI_{0.7T}$  de la  $i$ -ésima muestra y  $P_{vf}$  el valor de fondo  $MRI_{0.7T}$  seleccionado según el grupo de suelos. De tres MCS se seleccionaron los valores de fondo  $MRI_{0.7T}$ : i) MX068-S-C (Arenosol,  $MRI_{0.7T} = 2.10 \text{ mAm}^2\text{kg}^{-1}$ ); ii) MX077-S-C (Regosol,  $MRI_{0.7T} = 2.67 \text{ mAm}^2\text{kg}^{-1}$ ); iii) MX005-S-C (Vertisol,  $MRI_{0.7T} = 3.22 \text{ mAm}^2\text{kg}^{-1}$ ). El AM en muestras del grupo Tecnosol se calculó empleando como valor de fondo el  $MRI_{0.7T}$  de la muestra control MX005-S-C en virtud a que los Vertisoles son el grupo de suelos predominante en la zona de muestreo (INEGI, 2014).

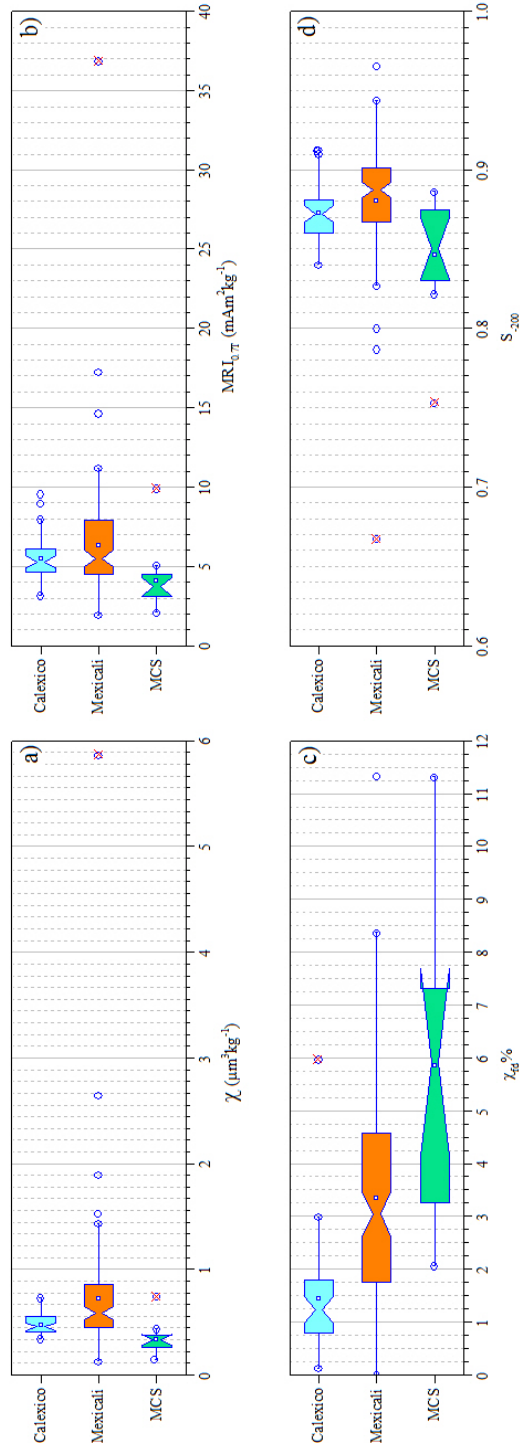
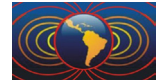
#### ***Análisis espacial.***

Con la matriz depurada de datos geo-referenciados del AM (excluyendo valores atípicos extremos) se determinó el patrón de correlación espacial del AM mediante un análisis geoestadístico, plasmando los resultados en un mapa. Se aplicó la siguiente rutina (Webster y Oliver, 2007): a) transformación logarítmica ( $\log_{10}$ ) de datos para garantizar una distribución normal; b) análisis estructural de la semivarianza calculando el semivariograma experimental y comparándolo con diferentes semivariogramas teóricos a fin de seleccionar el modelo de mejor ajuste; c) interpolación Kriging ordinario empleando el modelo seleccionado; d) representación cartográfica con gradación de colores desde el AM mínimo calculado (tonalidad verde-azul claro) hasta el AM máximo (tonalidad violeta oscuro); zonas con  $AM = 1$  se interpretan como “sin aumento magnético” o no contaminadas.

#### **Resultados y Discusión.**

Los diagramas de cajas y bigotes de la Figura 1 permiten comprobar que el conjunto MCS difiere estadísticamente de los conjuntos: a) Mexicali, para los cuatro parámetros magnéticos; b) Calexico, para tres parámetros (exceptuando el cociente  $S_{-200}$ , Fig. 1d). También existen diferencias entre parámetros magnéticos de los conjuntos Calexico-Mexicali, exceptuando  $MRI_{0.7T}$  (Fig. 1b). De especial importancia son las diferencias encontradas entre el conjunto de MCS y las muestras de Calexico y Mexicali para  $\chi$  y  $MRI_{0.7T}$  (Figs. 1a-1b), dado que ambos parámetros pueden ligarse a la concentración relativa de minerales magnéticos (Evans y Heller, 2003), concentración relacionada con una mayor acumulación de partículas magnéticas en Calexico-Mexicali al compararlas con las MCS, con la que se pueden identificar cambios espacio-temporales del contenido de partículas magnéticas o cambios en la fuente de origen de las mismas (Jordanova *et al.*, 2012).

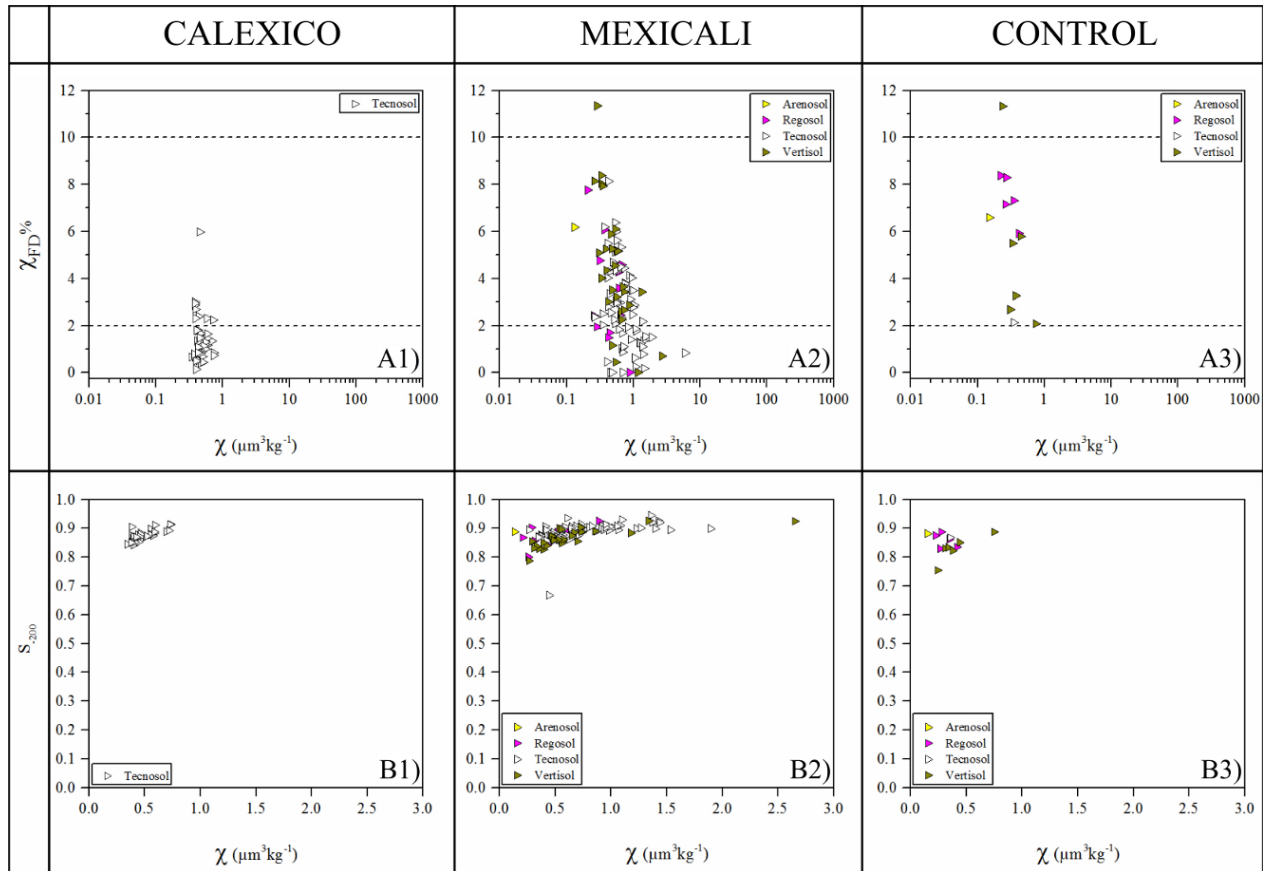
La Figura 2 muestra relaciones bivariadas de los parámetros  $\chi_{FD}\%$  y cociente  $S_{-200}$  con respecto de  $\chi$ , para conjuntos de muestras asociadas según su origen (Calexico-Mexicali-MCS) y discriminadas por grupo de



suelos. Las Figuras 2A muestran diferencias según su origen: i) la mayoría de valores para MCS (Fig. 2A3) pertenecen al intervalo  $\chi_{FD}$  % 2-10%, se interpreta como una mezcla de granos superparamagnéticos (SP) con granos gruesos de dominio magnético sencillo estable y/o granos gruesos multidominio, comprobando la presencia de minerales ferrimagnéticos SP de tamaño de grano ultrafino ( $<0.02 \mu\text{m}$ ) que se presentan como cristales originados por pedogénesis según Dearing (1999); ii) la mayoría de valores para Calexico (Fig. 2A1) se interpretan como muestras con concentraciones bajas (intervalo  $\chi_{FD}$  % 0-2%) o ausencia virtual de granos SP de tamaño ultrafino (Dearing, 1999), se infiere que las muestras poseen granos magnéticos de tamaño grueso con débil o nula dependencia de la frecuencia, posiblemente de origen antrópico. En Mexicali se observan valores en los dos intervalos mencionados (Fig. 2B2), la mayoría de valores para el intervalo 0-2% son muestras del grupo Tecnosol, resultados con igual interpretación que la dada para las muestras de Calexico. Las Figuras 2B muestran que la mayoría de valores  $S_{-200}$  están por encima de 0.8, con baja dispersión y distribución en torno a su media y mediana (Fig. 1d), hallazgos que revelan la abundancia de minerales magnéticos de baja coercitividad tipo ferrimagnéticos para los tres conjuntos de muestras.

La Figura 3 presenta las curvas  $\kappa$ -T de muestras seleccionadas. Los valores más altos de susceptibilidad en las curvas de enfriamiento revelan un comportamiento irreversible de sus fases magnéticas. En la curva de calentamiento de la Figura 3b se observa un máximo local seguido de un vertiginoso descenso, cercano a la  $T_C$ , interpretado como el pico de Hopkinson, el cual ha sido empleado como marcador de contaminación en suelos en estudios similares (Jeleńska *et al.*, 2004; Aguilar *et al.*, 2011). La  $T_C$  para las curvas 3a-3b se sitúa en el intervalo 580-590 °C, confirmando la presencia de

**Figura 1.** Diagramas de cajas y bigotes, discriminado por ciudad (Calexico-Mexicali) y muestras control de suelos (MCS), para: a)  $\chi$ ; b)  $MRI_{0.7T}$ ; c)  $\chi_{FD}$  %; d) cociente  $S_{-200}$ . La caja representa el rango intercuartílico (RQ =  $Q3-Q1$ ) del 50% de los datos, sus límites definen el primer ( $Q1$ ) y tercer cuartil ( $Q3$ ). El límite superior del bigote está definido por  $Q3+1.5RQ$  y el inferior por  $Q1-1.5RQ$ . El cuadro blanco dentro de la caja representa la media, los círculos azules valores atípicos y los círculos azules con equis roja valores atípicos extremos. La muesca o estrechamiento de la caja corresponde a la mediana con un intervalo de confianza del 95%. Las muescas son usadas para comparar entre grupos, si las muescas de dos cajas no se superponen se afirma que las medianas de ambos grupos difieren estadísticamente.

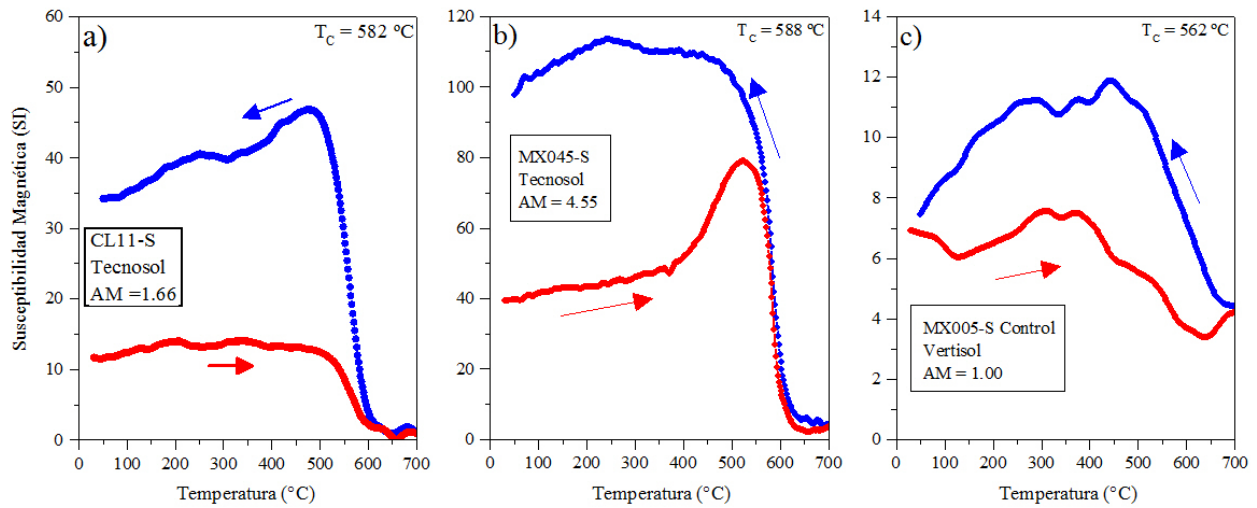
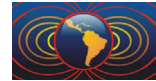


**Figura 2.** Diagramas de dispersión, discriminado por grupo de suelo, para: A)  $\chi_{FD}\%$  versus  $\chi$ ; B) cociente  $S_{-200}$  versus  $\chi$ . Las columnas corresponden a datos obtenidos de: 1) Calexico; 2) Mexicali; 3) muestras control de suelos. Para mejorar la visualización, en el diagrama B2 se excluyó la muestra MX026-S por poseer un valor extremo para  $\chi$  (Fig. 1a).

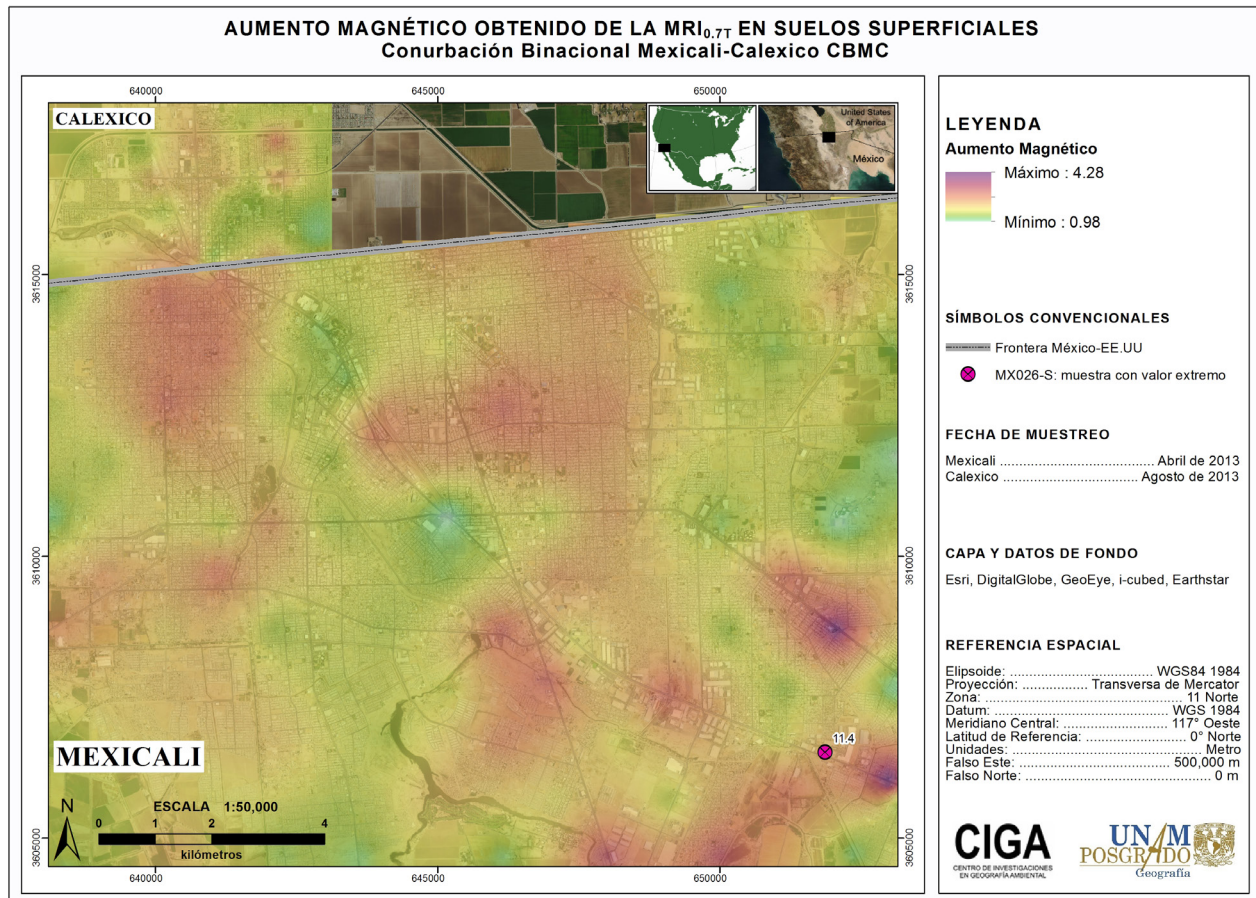
magnetita impura como fase magnética dominante. También se observan diferencias al comparar las curvas de calentamiento: discrepa el abrupto decaimiento a partir de 550 °C en muestras de Calexico-Mexicali (Figs. 3a-b) con el suave y sinuoso decaimiento a partir de 400 °C para la muestra control (Fig. 3c), aspecto que puede asociarse a la presencia de dos fases magnéticas en la muestra control.

La Figura 4 es la representación cartográfica del AM en suelos superficiales de la CBMC, obtenida del modelo teórico Exponencial (Webster y Oliver, 2007), que tuvo el mayor ajuste al semivariograma experimental ( $r^2 = 0.91$ ) entre todos los modelos teóricos analizados y es quien mejor modela la variación espacial del AM (Proporción = 0.95, rango = 2.25 km). Las zonas más oscuras del mapa representan localidades de mayor AM (tonalidades rojizas a violeta oscuro: dos a tres veces más AM comparado con localidades de AM = 1 “sin aumento magnético”); se ubican en el sureste de la CBMC donde convergen la principal zona industrial de Mexicali y vialidades troncales de tráfico pesado. Otras zonas con AM significativo (tonalidades rojizas) se observan hacia el norte de Mexicali, son localidades de tráfico vehicular liviano de carácter habitacional y comercial, existentes desde 1975 según modelos de uso y cobertura de suelo elaborados por Sánchez Flores *et al.* (2012), donde el AM podría explicarse por la sucesiva acumulación de partículas magnéticas durante al menos cuatro décadas. La zona de menor AM (tonalidad verde-azul clara) presente en el interior Mexicali en un cruce de vialidades troncales, se explica porque las muestras fueron tomadas de camellones de vialidades con modificaciones recientes, con posible introducción de suelo foráneo. Zonas con tonalidad

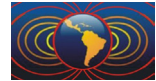




**Figura 3.** Curvas  $\kappa$ -T de muestras de suelos superficiales seleccionadas de: a) Calexico; b) Mexicali; c) muestra control de suelos. Las líneas rojas y azules indican curvas de calentamiento y enfriamiento, respectivamente.  $T_c$  es la temperatura de Curie. La leyenda en cada figura corresponde a identificador de muestra, grupo de suelo y AM calculado.



**Figura 4.** Mapa de distribución espacial del AM para la CBMC.



verde corresponden a menor AM, se interpretan como menos contaminadas.

### **Conclusiones.**

Los análisis de los diferentes parámetros magnéticos y su comparación entre conjuntos de muestras, señalan la presencia de minerales ferrimagnéticos de baja coercitividad tipo magnetita impura de origen antrópico en muestras de suelos superficiales de Mexicali-Calexico, que difiere de lo encontrado en las MCS.

La representación cartográfica del AM en la CBMC revela que la mayoría los suelos superficiales del área estudiada tienen algún grado de contaminación porque su AM es mayor que uno; localidades que acusan un mayor grado de contaminación pertenecen o colindan con la zona industrial del sureste de Mexicali.

### **Agradecimientos.**

Al CONACYT por el apoyo económico al proyecto clave CB-2011-01-169915.

### **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., Carvalho, C., Battu, J., 2013. 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.
- Dearing, J. A., 1999. Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2 System. British Library Cataloguing in Publication data, 54 pp.
- Evans, M. E., Heller, F., 2003. Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics. Academic Press, 317 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2014. Mapa Digital de México V6 (en línea). <<http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>>, consulta: 21 de agosto de 2014.
- International Union of Soil Sciences (IUSS) Working Group WRB, 2006. World Reference Base for Soil Resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication: Roma, FAO, 128 p.
- 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.
- Sánchez Flores, E., Díaz Caravantes, R. E., Bravo Peña, L. C., Zúñiga Patricio, B. L., 2012. Sistema de monitoreo de la dinámica de uso de suelo (MODUS) en la región binacional México-Estados Unidos: Geofocus. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 0 (12), 1-15.
- Wang, B., Xia, D., Yu, Y., Jia, J., Xu, S., 2014. Detection and differentiation of pollution in urban surface soils using magnetic properties in arid and semi-arid regions of northwestern China. *Environmental Pollution*, 184, 335-346.
- Webster, R., Oliver, M. A., 2007. Geostatistics for Environmental Scientists. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, John Wiley & Sons, Ltd, 330 pp.
- World Health Organization (WHO), 2011. Urban outdoor air pollution database (en línea). <[http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/databases/cities/en/](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/)>, consulta: 10 de septiembre de 2012.