



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PROPIEDADES MAGNÉTICAS Y SU RELACIÓN
CON EL CONTENIDO DE METALES PESADOS EN LAS ZONAS URBANA Y
COSTERA DE LÁZARO CÁRDENAS, MICHOACÁN**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

MARISOL FRAGOSO MALDONADO

TUTORA:

DRA. BERTHA OLIVA AGUILAR REYES
INSTITUTO DE GEOFÍSICA-UNAM

Morelia, Michoacán. Octubre 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicado con amor:

A mi mamá que siempre está apoyándome con sus sabias palabras y dándome muchos ánimos y amor.

A mi papá que siempre quiere que salga adelante.

A mis hermanitos Jesús y Ángel que los adoro.

A mi Alex que me brinda su amor y apoyo en los buenos y malos ratos de la vida.

Por eso, y por muchos más sentimientos indescriptibles...

Agradecimientos:

Quiero reconocer a la Dra. Bertha quien aceptó ser mi tutora y parte de mi formación académica en este grado compartiendo su conocimiento y amabilidad en todo momento.

Agradezco por la compañía y ayuda durante el arduo trabajo de campo a:
Dra. Bertha Aguilar, Dr. Rubén Cejudo y M.C. Alexander Sánchez.

Durante el trabajo de laboratorio y mi estancia en la Universidad de Burgos agradezco las atenciones, ayuda y amistad que me brindaron: Marifé, Manolo, Juanjo, Pablo, Elisa, Esther, Vicky y Pachón.

A todas las personas, profesores y amigos que me han acompañado en el transcurso de esta etapa y forman parte de ella.

Agradezco las valiosas observaciones a éste trabajo de tesis que aportaron mis sinodales: Dr. Felipe García, Dr. Adrián Ghilardi, Dra. María Felicidad Bógalo y Dr. Gabriel Vázquez.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), el Instituto de Geofísica Unidad Morelia (IGUM) y el apoyo CONACyT quienes hicieron posible la realización de ésta tesis de maestría, así como la estancia de investigación en el extranjero.

El PAEP por el apoyo económico para realizar el trabajo de campo, y por su puesto a la coordinación del CIGA quienes realizan e informan sobre los trámites del posgrado, especialmente Ruth.

Resumen

Lázaro Cárdenas es el puerto marítimo comercial e industrial más importante en el litoral Pacífico Mexicano. Desde su establecimiento en el año de 1971, fundamentó su viabilidad en los ricos yacimientos ferríferos de la zona. Su importancia radica en que más de la mitad del comercio se exporta a nivel mundial por vía marítima, lo cual demanda una infraestructura eficiente. Actualmente este municipio cuenta con un total de 178 817 habitantes, incluyendo la zona conurbada, de manera que es una ciudad desarrollada. Además de su importancia como centro turístico y su ubicación geográfica que abarca el 35 % de la costa Michoacana, alberga una gran biodiversidad que es indispensable proteger. La zona es sitio de reproducción y anidación de la tortuga negra (*Chelonia agassizii*) y en las últimas décadas se ha detectado una fuerte reducción en las poblaciones de estas especies de tortuga, por lo anterior es necesario contar con métodos de monitoreo de la contaminación; sin embargo, en esta ciudad no se cuenta con ello. Debido a que se han obtenido muy buenos resultados con la metodología magnética como método alternativo en el estudio de la contaminación ambiental, ésta fue empleada en el estudio de muestras ambientales de suelo y polvo resuspendido en la zona urbana y en muestras de arena de la zona costera de Lázaro Cárdenas. Mediante esta metodología se determinaron niveles relativos de contaminación en muestras provenientes de diferentes tipos de uso de suelo en la ciudad, con respecto a muestras de control. Se estudiaron las propiedades magnéticas de 85 muestras de suelo, 85 de polvo urbano, de 194 muestras de arena y 4 muestras control. Se midió la susceptibilidad magnética (χ_{if}), la Magnetización Remanente Anhisterítica (ARM), se obtuvieron curvas termomagnéticas y se realizaron análisis químicos en muestras seleccionadas para determinar la correlación entre el nivel de metales pesados y los valores de los parámetros magnéticos medidos. Se determinó una mayor concentración magnética en los sitios con mayor afectación por tráfico vehicular, además de la zona cercana a la industria. Se encontró una alta correlación ($R^2 > 0.9$) entre los valores de las propiedades magnéticas y el contenido de metales pesados.

CONTENIDO

Dedicatorias

Agradecimientos

Resumen

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Justificación y planteamiento del problema.....	12
1.2 Objetivo general.....	13
1.2.1 Objetivos particulares.....	14
1.3 Antecedentes.....	14
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ÁREA DE ESTUDIO.....	19
2.1 Campo magnético.....	19
2.1.1 Dominios magnéticos.....	19
2.1.2 Propiedades magnéticas de los materiales: Diamagnetismo, Paramagnetismo, Ferromagnetismo, Ferrimagnetismo y Antiferromagnetismo.	20
2.1.3 Principales minerales magnéticos: magnetita, maghemita, hematita, oxihidróxidos de hierro y sulfuros de hierro.....	24
2.1.4 Parámetros magnéticos: Susceptibilidad magnética (χ_{lf}), Magnetización Remanente Natural (NRM por sus siglas en inglés), Magnetización Remanente Anhistéretica (ARM).....	28
2.2 Metales pesados.....	30
2.3 Análisis geoestadístico y Sistema de Información Geográfica.....	31
2.4 Norma Oficial Mexicana (NOM).....	32
2.5 Área de estudio.....	33
2.5.1 Localización.....	33
2.5.2 Clima y condiciones meteorológicas.....	34
2.5.3 Geología.....	35
2.5.4 Edafología.....	35

2.5.5	Hidrología	37
2.5.6	Flora	39
2.5.7	Fauna	39
2.5.8	Actividades económicas	40
2.5.9	Uso de suelo urbano.....	40
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....		42
3.1	Polvo urbano y Suelo superficial	42
3.1.1	Muestreo.....	42
3.1.2	Equipo y parámetros magnéticos medidos en el laboratorio	45
3.1.3	Análisis de datos.....	49
3.2	Sedimentos costeros.....	51
3.2.1	Muestreo.....	51
3.2.2	Submuestreo y preparación de muestras discretas.....	53
3.2.3	Laboratorio: Mediciones magnéticas y químicas	54
CAPÍTULO 4. RESULTADOS		57
4.1	Polvo urbano y Suelo superficial	57
4.1.1	Susceptibilidad dependiente de la frecuencia (χ_{fd} %)	57
4.1.2	Curvas k-T	58
4.1.3	Curvas ARM	60
4.1.4	Cuantificación de metales pesados	60
4.1.5	Correlaciones entre parámetros magnéticos y metales pesados	65
4.1.6	Distribución espacial de χ_{lf} y ARM en la zona urbana de Lázaro Cárdenas, Michoacán	68
4.2	Sedimentos costeros.....	76
4.2.1	χ_{lf} en submuestras continuas y discretas.....	80

4.2.2	Curvas κ -T	82
4.2.3	Curvas de ARM	85
4.2.4	NRM, ARM y $\chi_{fd}\%$ en sedimentos costeros	87
4.2.5	Metales pesados.....	93
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN		96
5.1	Discusión.....	96
5.1.1	Polvo urbano y Suelo superficial.....	96
5.1.2	Sedimentos costeros	97
5.2	Conclusión	99

Bibliografía consultada

Índice de Figuras

Fig. 2-1.	Diagrama de la pared de Bloch (Butler, 1992).	20
Fig. 2-2.	Estructuras de dominio alternativas para los tamaños de grano. a) de un solo dominio: estructura de polos muy separados unidos por lazos de flujos externos, b) estructura de dos dominios: polos con menos separación entre los flujos externos, c) de cuatro dominios en patrón laminar y d) estado de dos dominios con los dominios de cierre (Tauxe et al., 2010).	20
Fig. 2-3.	Comportamiento magnético de los materiales	24
Fig. 2-4.	Diagrama que muestra las principales series de minerales magnéticos, con línea azul se representa la serie de las titanomagnetitas, y con línea roja la serie de hemoilmenita, las líneas punteadas indican la oxidación aumentando Z.	25
Fig. 2-5.	Mapa de localización la ciudad de Lázaro Cárdenas, Michoacán y la ubicación de las zonas urbana y costera, donde se sitúan los puntos de muestreo.....	34
Fig. 2-6.	Mapa de la Geología de Lázaro Cárdenas, Michoacán.	35
Fig. 2-7.	Mapa de grupos de suelo de Lázaro Cárdenas, Michoacán.	37
Fig. 2-8.	Mapa de la Hidrología de Lázaro Cárdenas, Michoacán.....	38
Fig. 2-9.	Mapa de uso de suelo urbano de Lázaro Cárdenas, Michoacán.	41
Fig. 3-1.	Muestreo y preparación de polvo urbano. a) Colecta de muestra sobre carretera, b) Tamizado de polvo para retirar los materiales ajenos a la muestra, y c) Introducción de la muestra de polvo previamente tamizado al cubo de plástico.	43
Fig. 3-2.	Muestreo y preparación de suelo superficial. a) Colecta de suelo control en áreas verdes, b) Colecta de suelo superficial en áreas verdes, c) Suelo muestreado, d) Secado del suelo en el	

laboratorio, e) Trituración de muestras de suelo con el mortero, y f) Tamizado de suelo para después introducirlo a cubos de plástico.....	44
Fig. 3-3. Equipo de laboratorio: a) Susceptíbilímetro Kappabridge KLY-4	46
Fig. 3-4. Equipo de laboratorio: a) Magnetómetro criogénico superconductor 2G 755 con brazo de portamuestras automático (rodeado por la bobina de Helmholtz) y b) Desmagnetizador por campos alternos e inductor de ARM.	47
Fig. 3-5. Variogramas teóricos (García, 2009).....	49
Fig. 3-6. Muestreo del núcleo: a) Selección del sitio, b) Introducción del núcleo a presión, c) Extracción del núcleo, d) Etiquetado y sellado del núcleo extraído por ambos lados.	52
Fig. 3-7. Mapa Identificación de los núcleos extraídos de la playa de Lázaro Cárdenas. Cada número correspondiente al identificador etiquetado desde la colecta de los núcleos: 1 → LC01, 3 →LC03, 4 →LC04, 5 → LC05, 6 →LC06, 7 →LC07, 9 →LC09, 10 →LC10 y 11 →LC11 de costa de la playa de Lázaro Cárdenas, Michoacán.....	53
Fig. 3-8. Submuestreo y preparación del material: a) División del núcleo con taladro de disco eléctrico, b) Observación de capas y submuestreo de núcleo, c) Secado del material en cajas de petri y d) Medición de las muestras fijadas en cubos de plástico.	54
Fig. 3-9. a) Medición de susceptibilidad magnética previa al submuestreo de los núcleos usando el sensor MS2C y b) Medición de susceptibilidad magnética a dos frecuencias (κ_{hf} y κ_{lf}) después del submuestreo usando el sensor dual MS2B.....	55
Fig. 4-1. Gráfica de dispersión de χ_{fd} % vs χ discriminando muestras por uso de suelo, para: a) Polvo; y, b) Suelo.....	58
Fig. 4-2. Curvas k-T de muestras de Polvo urbano (LC08-P, LC28-P) y Suelo superficial (LC08-S, LC28-S).....	59
Fig. 4-3. Curvas de adquisición de ARM para muestras seleccionadas de acuerdo a los valores más altos de χ_{lf} de algunos usos de suelo urbano en: a) Polvo y b) Suelo.	60
Fig. 4-4. Concentraciones V, Zr, Zn, Cr, Pb y Ni (mg kg^{-1}) analizados en muestras de polvo.	63
Fig. 4-5. Concentraciones V, Zr, Zn, Cr, Pb y Ni (mg kg^{-1}) analizados en muestras de suelo.	64
Fig. 4-6. Correlaciones obtenidas de χ_{lf} con Cr, Cu, Co y Fe en polvo de Lázaro Cárdenas.....	65
Fig. 4-7. Correlaciones obtenidas de ARM con Cr, V, Fe, Co y Cu en polvo de Lázaro Cárdenas.	66
Fig. 4-8. Correlaciones obtenidas de χ_{lf} con Fe, Cr, Co, Cu, Pb, V, Zn y Ni en suelo de Lázaro Cárdenas.	67
Fig. 4-9. Correlaciones obtenidas de ARM con Zn, Co, Fe, V, Cu, Cr y Pb en suelo de Lázaro Cárdenas.	67
Fig. 4-10. Semivariogramas experimentales encontrados en a) Polvo y b) Suelo, con las variables de χ y ARM. La (h) es la distancia de separación entre puntos muestrales, el Co es el nugget ó semivarianza al azar, el Co + C es el Sill ó semivarianza estructural, Ao es el parámetro para	

calcular el rango del modelo, el r^2 es el coeficiente de determinación del modelo y el RSS es la suma residual de cuadrados.	69
Fig. 4-11. Mapa geoestadístico que representa los valores de χ de polvo. El variograma Isotrópico muestra un $r^2= 0.904$	72
Fig. 4-12. Mapa geoestadístico que representa los valores de ARM de polvo. El variograma Isotrópico muestra un $r^2= 0.900$	73
Fig. 4-13. Mapa geoestadístico que representa los valores de χ de suelo. El variograma Isotrópico muestra un $r^2= 0.880$	74
Fig. 4-14. Mapa geoestadístico que representa los valores de ARM de suelo. El variograma Isotrópico muestra un $r^2= 0.825$	75
Fig. 4-15. Susceptibilidad magnética en mediciones continuas y discretas de las submuestras obtenidas de los núcleos costeros. La franja amarilla es la profundidad a la que la tortuga negra deposita sus huevos durante el periodo de incubación.	81
Fig. 4-16. Curvas κ -T del Núcleo 1 y Núcleo 3. Entre paréntesis se indica el número de submuestra.	82
Fig. 4-17. Curvas κ -T del Núcleo 4 y Núcleo 5. Entre paréntesis se indica el número de submuestra.	83
Fig. 4-20. Curvas κ -T del Núcleo 6 y Núcleo 7. Entre paréntesis se indica el número de submuestra.	83
Fig. 4-19. Curvas κ -T del Núcleo 9 y Núcleo 10. Entre paréntesis se indica el número de submuestra.	84
Fig. 4-20. Curvas κ -T del Núcleo 11. Entre paréntesis se indica el número de submuestra.	84
Fig. 4-21. Curvas de adquisición de ARM para muestras seleccionadas de acuerdo a los valores más altos de χ_{if}	86
Fig.4-22. Curvas de adquisición de ARM para muestras seleccionadas de acuerdo a los valores más bajos de χ_{if}	87
Fig. 4-23. Variación a profundidad de los diferentes parámetros magnéticos medidos en: a) Núcleo 1 y b) Núcleo 3.	88
Fig. 4-24. Variación a profundidad de los diferentes parámetros magnéticos medidos en: a) Núcleo 4 y b) Núcleo 5.	89
Fig. 4-25. Variación a profundidad de los diferentes parámetros magnéticos medidos en: a) Núcleo 6 y b) Núcleo 7.	90
Fig. 4-26. Variación a profundidad de los diferentes parámetros magnéticos medidos en: a) Núcleo 9 y b) Núcleo 10.	91
Fig. 4-27. Variación a profundidad de los diferentes parámetros magnéticos medidos en: Núcleo 11.	92
Fig. 4-28. Presencia de metales pesados detectados a diferentes profundidades en los núcleos.	94

Índice de tablas

Tabla 2-1. Límites máximos permisibles de algunos metales pesados establecidos por Normas Oficiales de México, Unión Europea (U.E.) y Estados Unidos de América (E.U.A).....	30
Tabla 2-2. Concentraciones de metales pesados y sus variaciones en suelos, litosfera y rocas (mgkg^{-1}) en material seco.	31
Tabla 2-3. Concentraciones de metales pesados detectados en huevos de tortuga verde (<i>Chelonia mydas</i>). (Eisler, 2010; Storelli y Marcotrigiano, 2003).....	31
Tabla 2-4. Descripción resumida de los grupos de suelo presentes en la zona de estudio (IUSS Working Group WRB, 2006).	36
Tabla 3-1. Número de muestras analizadas en el laboratorio para polvo y suelo urbano.	48
Tabla 3-2. Número de submuestras de arena obtenidas de los núcleos y los diferentes parámetros medidos en el laboratorio	56
Tabla 4-1. Muestras de polvo y suelo urbano pertenecientes a diferentes usos de suelo.	58
Tabla 4-2. Concentración de metales pesados en muestras de polvo urbano, determinadas mediante FRX (mg kg^{-1} material seco).	61
Tabla 4-3. Concentración de metales pesados en muestras de suelo superficial, determinadas mediante FRX (mg kg^{-1} material seco).	62
Tabla 4-4. Modelos teóricos ajustados a semivariogramas experimentales de variables de propiedades magnéticas medidas en muestras de polvo y suelo urbano.	68
Tabla 4-5. Descripción general del núcleo 1 y 3.....	76
Tabla 4-6. Descripción general del núcleo 4 y 5.....	77
Tabla 4-7. Descripción general del núcleo 6 y 7.....	78
Tabla 4-8. Descripción general del núcleo 9 y 10.....	79
Tabla 4-9. Descripción general del núcleo 11.....	80
Tabla 4-10. Muestras de sedimentos costeros determinados mediante FRX (mg kg^{-1} material seco).	93

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Generalmente la acumulación de metales pesados, en su mayoría ocurre de manera natural en el ambiente sin representar un peligro para la biosfera; sin embargo, cuando las concentraciones de estos elementos son elevadas significa que éstos son derivados de fuentes antrópicas en formas solubles que causan contaminación. La acumulación excesiva de estos Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) desencadena una serie de problemas ambientales y de salud provocando la aparición de enfermedades respiratorias y carcinogénicas en el ser humano (Boudou y Ribeyre, 1989).

La contaminación por metales pesados se puede esparcir en varios ambientes dependiendo del estado en que se encuentre (sólido, líquido y gaseoso), ocasionando altos grados de toxicidad en las personas más vulnerables como niños y personas de la tercera edad debido a que la inhalación de aire, ingesta de agua y alimentos contaminados, y la absorción a través de la piel, pueden originar efectos dañinos dependiendo de la dosis que el organismo haya acumulado (SEMARNAP, 2000).

Sin embargo el evaluar este tipo de contaminación resulta difícil, ya que las sustancias químicas se encuentran por doquier y sus concentraciones naturales son poco conocidas variando en distintas regiones del país. Los contaminantes llegan de manera indirecta al medio ambiente, puesto que actualmente vivimos en una sociedad moderna donde constantemente hacemos uso de productos químicos tanto en el hogar, como en los sitios de trabajo (agricultura e industria); se emiten grandes cantidades de residuos e inevitablemente se origina esta problemática, quedándose muchos residuos sin tratar o con tratamientos deficientes.

Así, se tiene la presencia de elevadas concentraciones de EPT definidos así por el Instituto Nacional de Ecología (INE) para referirse a todas aquellas sustancias tóxicas que ejercen efectos nocivos, crónicos, agudos, reversibles e irreversibles y

que afectan al individuo expuesto o que incluso llegan a dañar su descendencia teniendo un impacto transgeneracional.

En los últimos años se han desarrollado técnicas para resolver problemas medioambientales, que permiten conocer las principales fuentes de contaminación, su cuantificación y el alcance de afectación en distintos ambientes. Dentro del magnetismo ambiental, que es un campo de estudio interdisciplinario, se ha adaptado la metodología magnética, para resolver diferentes problemas de investigación a través de un conjunto de mediciones que ofrecen brindar aproximaciones a través de parámetros magnéticos medidos, los cuales resultan ser muy prácticos para resolver estas inquietudes, reduciendo los factores costo-tiempo (Thompson y Oldfield, 1986).

Para lograr los objetivos de este estudio, identificar y evaluar la contaminación urbana y costera del municipio de Lázaro Cárdenas, Michoacán, se hace el uso de ésta metodología para obtener información de manera indirecta sobre cambios que han ocurrido en el ambiente; lo anterior, con el apoyo de las técnicas tradicionales como los análisis químicos y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Es claro que la contaminación en playas no solo afecta la salud de los usuarios de las mismas, sino a otras especies propias del ecosistema. Cabe señalar que en la costa de Michoacán se ubica la zona más importante de reproducción y anidación de la tortuga negra (*Chelonia agassizii*, Bocourt, 1868), sin embargo se ha detectado la fuerte reducción en las poblaciones de tortuga negra debido a factores que influyen en la selección de playa para desovar en las temporadas de anidación (Alvarado y Delgado, 2005).

1.1 Justificación y planteamiento del problema

El Puerto de Lázaro Cárdenas establecido en el año de 1971, se ha convertido en uno de los más importantes del país dentro del ámbito económico-industrial, ya que más de la mitad del comercio se exporta a nivel mundial por vía marítima; estas actividades demandan de una infraestructura eficiente para cubrir dichas

necesidades (SEMARNAT, 2010) para evitar emisiones de gases y descargas de los residuos industriales que provocan daños en el medio ambiente.

Actualmente este municipio ocupa el cuarto lugar en cuanto a número de habitantes de manera que es una ciudad desarrollada con un significativo porcentaje de población en el estado de Michoacán (INEGI, 2012); además, comprende el 35 % de la costa dentro del estado de Michoacán, misma que alberga playas de anidación de tortugas marinas; algunas especies cuyos ejemplares habitan libremente, han disminuido drásticamente poniendo en riesgo su viabilidad biológica en su hábitat natural, debido a factores tales como la destrucción o modificación del hábitat y que según la Norma Oficial Mexicana-NOM-059 es importante conservar debido a que se encuentran en la categoría de: *riesgo en peligro de extinción* (SEMARNAT, 2010).

Considerando los argumentos que se mencionan, se escogió ésta área de estudio, seleccionando sitios de interés, tanto en la zona urbana como en la costa, para obtener muestras representativas que arrojaran la información requerida sobre la contaminación por metales pesados en diferentes tipos de muestras ambientales: polvo urbano, suelo superficial y sedimentos costeros.

Es notable que este municipio genera problemas ambientales, sociales y económicos por ser una ciudad industrial, comercial y turística; lo anterior debido a que se promueve la urbanización, el crecimiento de nuevos polos de desarrollo y la práctica excesiva de actividades económicas como el comercio, industria, agricultura, pesca y turismo, incrementando la explotación de los recursos naturales. Así, el daño generado afecta tanto a los habitantes de la ciudad como a los ecosistemas de fauna silvestre perteneciente a la región costa, por lo que se pretende llevar a cabo un estudio de la contaminación de manera cualitativa y cuantitativa.

1.2 Objetivo general

- ✓ Evaluar la contaminación por metales pesados en las zonas urbana y costera de Lázaro Cárdenas, Michoacán, identificando las principales fuentes emisoras y modelando la distribución espacial de dichos contaminantes.

1.2.1 Objetivos particulares

- ✓ Evaluar la contaminación urbana utilizando la metodología magnética y correlacionando con los resultados de análisis geoquímicos en diferentes tipos de materiales ambientales (polvo urbano, suelo superficial y sedimentos costeros).
- ✓ Identificar en la zona urbana los sitios más afectados por contaminación mediante la distribución espacial de los valores de parámetros magnéticos obtenidos de polvo urbano y suelo superficial.
- ✓ Determinar el nivel de contaminación en los sitios de anidación de tortuga negra (*Chelonia agassizii*) a la profundidad que ésta especie desova.

1.3 Antecedentes

En México, para el año 1999 se emitieron 40.5 millones de toneladas de contaminantes a la atmósfera de acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones (INEM). En el INEM se señala que al año se desechan alrededor de 36.9 millones de toneladas de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que equivalen a casi 101 mil toneladas/día, y en los últimos diez años ha incrementado en total en un 26%. Algunos indicadores de calidad del agua muestran que 73% de los cuerpos de agua del país están contaminados y estas descargas provienen principalmente de centros urbanos e industriales que las vierten directamente en el ambiente sin tratamiento previo (Riojas-Rodríguez et al., 2013).

La industrialización ha tenido impactos positivos en la sociedad así como efectos negativos en el ambiente, debido a la generación de contaminantes que a la hora de ser depositados en los espacios de disposición final no se tratan adecuadamente. Los residuos de las diferentes actividades humanas han dejado huella prácticamente en cualquier lugar; ejemplo de ello son los problemas atmosféricos que se presentan a lo largo del planeta. Los efectos sobre la salud de la población y los ecosistemas naturales, son la disminución de la calidad del aire y el fenómeno de cambio climático global (PNUMA, 2003).

La preocupación surge de esta problemática, ya que los seres humanos somos los principales organismos susceptibles a cualquier alteración y/o perturbación a causa de la constante interacción con los diferentes tipos de compuestos presentes en el medio ambiente y la exposición a la contaminación que perjudica a la salud. Existen diversos estudios de salud pública, que permiten estimar los impactos bajo algunos escenarios específicos integrados por fuentes móviles (vehículos), puntuales (industrias), naturales (erosión del suelo) y de área (servicios, comercios y residencias) (SEMARNAT y INECC, 2011).

Además del impacto ambiental por contaminación, existe el impacto ambiental por aprovechamiento de recursos naturales renovables y no renovables, lo cual es una de las principales causas de pérdida de la biodiversidad, y tiene que ver con las actividades económicas que se practican en los puertos y que generan un deterioro en los ecosistemas marinos. Estas actividades que comprenden desde las primarias como la pesca, hasta las actividades secundarias como el desarrollo turístico, significan la ocupación del territorio y la modificación de las condiciones naturales por acciones tales como establecimientos de zonas hoteleras e infraestructuras de transporte marítimo; a lo anterior hay que añadir las fuentes difusas de aporte de contaminantes procedentes del transporte y uso del combustible fósil, que modifican al ambiente negativamente (Botello, 2001; SEMARNAT, 2013).

Cabe recordar que la contaminación se define como el incremento anormal de sustancias que ejercen un daño sobre los ecosistemas (Bautista, 1999). La propagación de estas partículas contaminadas y metales pesados hace que se acumulen en la superficie del suelo, y llegan a asociarse con el material particulado (PM) de tamaño inferior a 10 micras (PM_{10} y $PM_{2.5}$) suspendido en el aire; esto es una preocupación desde hace algunos años debido a que su presencia está relacionada con enfermedades respiratorias y cánceres (Harrison et al., 1997; OMS, 2011).

La contaminación ambiental participa de forma importante como una de las principales causas de infecciones respiratorias, principalmente. Por lo anterior,

resulta de vital importancia conocer los niveles de contaminación atmosférica, sobre todo en ciudades con gran actividad industrial.

En los lugares donde no existen sistemas de monitoreo, ya que los tradicionales son costosos y requieren de tiempo, el magnetismo ambiental es una alternativa que resuelve de manera rápida y confiable un problema de investigación de este tipo (Bityukova et al., 1999). Para optimizar este tipo de investigaciones, es necesario utilizar la combinación de análisis geofísicos y geoquímicos (Lecoanet et al., 2003).

En efecto, en las últimas décadas se han perfeccionado técnicas de magnetismo de rocas que se utilizan en el estudio de materiales ambientales como sedimentos, suelos y hojas, para evaluar la contaminación de manera relativa al medir la señal magnética de dichos materiales, y comparando con una referencia. De esta manera, se obtiene el nivel de contaminación, y se identifican los efectos medio ambientales (Thompson y Oldfield, 1986). Esta metodología permite monitorear la emisión de contaminantes de manera rápida y permite identificar cambios en el uso del suelo, de este modo, los materiales que contienen Fe, son susceptibles de adquirir una magnetización permanente (Jordanova et al., 2004).

Estudios previos demuestran que los valores de algunos parámetros magnéticos en materiales ambientales, aumentan debido a la acumulación de partículas aerotransportadas que son producto de procesos de combustión como el uso excesivo de automóviles e industrialización, y que probablemente sufrieron una oxidación produciendo magnetita (Aguilar et al., 2011b).

Generalmente, esas partículas están fuertemente asociadas con metales pesados (Hunt et al., 1984; Petrovský y Ellwod, 1999). Uno de los parámetros magnéticos que se evalúan es la susceptibilidad magnética (χ_{if}), que puede correlacionar el proceso de combustión con el potencial mutagénico de las partículas provenientes de fuentes antrópicas que inevitablemente se respiran en el ambiente ambiente (Morris et al., 1995). Estas partículas están frecuentemente compuestas por materiales ferromagnéticos (antiferromagnéticos y ferrimagnéticos) (Petrovský y Ellwood, 1999). La χ_{if} permite establecer las fuentes de contaminación y anomalías geoquímicas a

través de los valores que se observen en muestras de suelo de diferente tipo de uso, ya que existe una relación entre un alto contenido de minerales magnéticos y metales pesados (Bityukova et al., 1999).

El índice de contaminación antrópica se puede determinar mediante el fenómeno de aumento magnético, el cual se debe a la conversión de materiales no-ferrimagnéticos in situ, o bien, a un aporte extra de materiales ferrimagnéticos. Las partículas contaminantes pueden incorporarse en los sedimentos causando aumento magnético o cambios en sus características. Estos cambios se detectan, en el material enriquecido con partículas contaminantes, con valores elevados de susceptibilidad magnética en función del tamaño de partícula y el comportamiento de las partículas magnéticas (Aguilar et al., 2011a)

Por otro lado, los sedimentos marinos se han convertido en un archivo muy importante de minerales magnéticos relacionados con diversos aspectos del ámbito ambiental (Evans y Heller, 2003).

Recientemente, la metodología magnética se utilizó para identificar la presencia de contaminación asociada a metales pesados en tres playas de anidación de la tortuga negra (Lázaro Cárdenas, Maruata y Colola) en la zona costera de Michoacán, donde se detectaron grandes diferencias entre los tres sitios, presentando los valores más elevados de minerales magnéticos y con menos registros de nidos por temporada reproductiva la playa de Lázaro Cárdenas, seguida de Maruata y la más conservada y de mayor visitas anidatorias, la playa de Colola (Fragoso, 2013).

En el caso particular de la playa de anidación, los contaminantes dispersos en las playas intervienen en las fases del desarrollo embrionario de la tortuga negra durante su período de incubación, lo que ocasiona que un porcentaje significativo de huevo no eclosionen y/o en algunos casos lleguen a nacer crías con malformaciones genéticas debido a la presencia de metales pesados que se acumulan a la profundidad en que las tortugas marinas desovan (Fragoso, 2013), ya que los huevos absorben la humedad y las sustancias disueltas en el ambiente, siendo así la arena de las playas, un factor importante que influye en dos aspectos del comportamiento

de las tortugas marinas: por un lado la selección de la playa y, por otro lado, la preservación de los huevos depositados en las condiciones adecuadas para un buen desarrollo durante la formación de las crías (Mortimer, 1995).

La fuerte señal magnética presente en sedimentos establece una posible relación con las concentraciones de metales pesados antropogénicos. Estas correlaciones fueron observadas en un caso de estudio del Este de China en lago Wuhan, observando muestras de sedimentos extraídos cerca de las fuentes de contaminación: por ejemplo, la compañía Wuhan Hierro y acero, la orilla del lago y la zona turística (Yang et al., 2007).

En estudios previos, las correlaciones más importantes que presentan altos niveles de significancia alcanzan $r^2 = 0.90$ y 0.83 con los parámetros magnéticos χ y ARM como indicadores de contaminación por metales pesados realizando una discriminación de muestras con las fases magnéticas (Chaparro et al., 2005; Jordanova et al., 2003).

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Campo magnético

El Campo Magnético Terrestre o CTM protege a la tierra de la radiación cósmica. El comportamiento del CTM se puede aproximar al producido por un dipolo geocéntrico que se comporta como un imán con sus polos Norte y Sur, del cual conocemos su existencia por el efecto que produce sobre objetos, tales como piezas de metal, rocas naturalmente magnéticas, imanes temporales, etc. (Tauxe et al., 2010).

Gracias a este fenómeno, el cual se conoce desde hace muchos años existen minerales magnetizados con diferentes propiedades magnéticas que se observan en la materia (diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo y antiferromagnetismo). Para comprender dicho fenómeno magnético es importante describir la estructura atómica según el modelo simple de Bohr y las interacciones que se presentan para que ocurra una magnetización.

2.1.1 Dominios magnéticos

Los “dominios magnéticos” es un término propuesto por Weiss en 1907, quien planteaba que el grano magnético estaba dividido en varios dominios o regiones, los cuales presentan un ordenamiento de momentos magnéticos en una dirección, provocando una magnetización predominante y que la suma de estos dominios magnetizados podía ser cero. Posteriormente Bloch en 1930, propuso que los dominios estaban separados por zonas de energía y espesores finitos; es así como se pueden generar varios tipos de dominios, como son: los dominios sencillos y dominios múltiples, dependiendo del tamaño del grano y de la superficie de éste, lo que dio origen a estas zonas conocidas como paredes de Bloch (Fig. 2-1) (Butler, 1992).

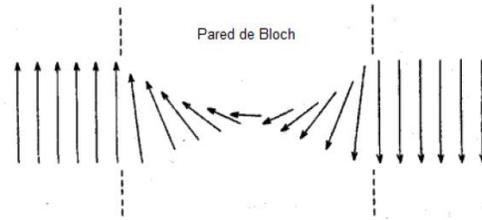


Fig. 2-1. Diagrama de la pared de Bloch (Butler, 1992).

Conforme decrece el tamaño de grano disminuye el número de dominios; los granos con un solo dominio se les llama dominio sencillo (**SD**): Los cambios en la magnetización de este dominio ocurren por la rotación simultánea de los espines; los que contienen más de un dominio se les llama multidominio (**MD**), los cambios en la magnetización pueden ocurrir por el movimiento de las paredes, por la formación de dominios o por la deformación de dominios; existe también el dominio pseudo-sencillo (**PSD**), cuya magnetización no es uniforme debido a que el tamaño del grano es mayor (Fig. 2-2) (Dunlop y Özdemir, 1997) .

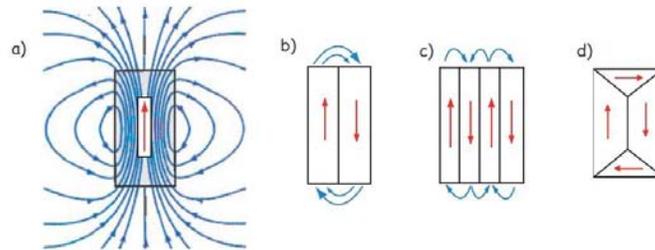


Fig. 2-2. Estructuras de dominio alternativas para los tamaños de grano. a) de un solo dominio: estructura de polos muy separados unidos por lazos de flujos externos, b) estructura de dos dominios: polos con menos separación entre los flujos externos, c) de cuatro dominios en patrón laminar y d) estado de dos dominios con los dominios de cierre (Tauxe et al., 2010).

2.1.2 Propiedades magnéticas de los materiales: Diamagnetismo, Paramagnetismo, Ferromagnetismo, Ferrimagnetismo y Antiferromagnetismo.

El diamagnetismo

Es una propiedad de los materiales, que se produce por una carga en movimiento, como la de un electrón sobre su órbita; este movimiento experimenta una fuerza de Lorentz $e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ bajo la acción de un campo magnético. La fuerza de Lorentz tiene un efecto giroscópico, causando un movimiento de precesión en todas las órbitas de electrones alrededor de B . Esta precesión de Larmor de electrones Z (Z es el número atómico) es equivalente a una corriente eléctrica y produce un momento magnético inducido opuesto a la dirección del campo aplicado (Dunlop y Özdemir, 1997).

$$\mu_d = \frac{Ze^2(\rho^2)}{4m_e} B \quad \text{Ecuación 2-1}$$

En estos materiales, la susceptibilidad diamagnética es negativa e independiente de la temperatura. Algunos ejemplos corresponden a minerales como el cuarzo, feldespatos y calcita (Fig. 2-3 a).

El paramagnetismo

El paramagnetismo es la alineación parcial de los momentos magnéticos permanentes en dirección de un campo aplicado B . Los momentos magnéticos del espín tienden a ordenarse paralelamente con el campo aplicado, causando una magnetización positiva débil, y al retirar el campo exterior la magnetización del material se anula (Fig. 2-3 b). Algunos minerales como el olivino, piroxeno, granate, biotita y carbonatos de hierro y magnesio presentan este comportamiento (Dunlop y Özdemir, 1997; Thompson y Oldfield, 1986).

La alineación de los momentos es pequeña y la susceptibilidad paramagnética (χ_p) es inversamente proporcional a la temperatura: Ley de Curie.

$$\chi_p = \frac{M}{H} = \frac{1}{3} \frac{n\mu^2\mu_0}{k} \frac{1}{T} = \frac{C}{T} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Siendo M paralelo a B (una pequeña fracción del valor de saturación $n\mu$); k , es la constante de Boltzmann y C , la constante Curie.

En consecuencia, la magnetización resultante disminuye a medida que aumenta la temperatura. Muchos minerales de interés para estudios ambientales son

paramagnéticos y se debe tomar en cuenta que, puede producir “ruido” en lugar de “señal”; sin embargo, tener información de la contribución de minerales paramagnéticos en la magnetización neta puede ayudar a aislar adecuadamente la componente ferromagnética (Evans y Heller, 2003).

El ferromagnetismo

Los materiales ferromagnéticos como el hierro, cobalto y níquel y sus aleaciones, se comportan de manera muy diferente a los diamagnéticos y paramagnéticos (donde M desaparece cuando B se elimina). Weiss (1907) explicó estas observaciones desconcertantes postulando la existencia de un "campo molecular" interno tan fuerte que trae momentos atómicos en la alineación de saturación, produciendo una magnetización espontánea M_s (Fig. 2-3 c). Esto ocurre debido a que el subnivel $3d$ interactúa sin ser llenado y el momento magnético posee 4 magnetones de Bohr. En la red cristalina de los materiales ferromagnéticos, átomos adyacentes son suficientemente próximos entre sí, de modo que algunos de los orbitales de electrones se superponen formando así una fuerte interacción incluso en ausencia de un campo magnético.

Este acoplamiento de intercambio significa que, en lugar de ser dirigido al azar, los momentos magnéticos de todos los átomos en la red están alineados, dando lugar a una fuerte magnetización. Esta disposición se representa generalmente como una matriz regular de todas las direcciones paralelas a la misma longitud y alineación. Este es el ferromagnetismo en su forma más simple, pero puede dar lugar a otras configuraciones (Tauxe et al., 2010).

Los materiales ferromagnéticos, se caracterizan por la forma en cómo cambian sus propiedades magnéticas a una temperatura crítica llamada Temperatura de Curie (T_C). Para un mineral ferromagnético a una temperatura dada existe un máximo de magnetización, llamada magnetización de saturación J_s . (Butler, 1992; Thompson y Oldfield, 1986).

El ferrimagnetismo

Los minerales ferrimagnéticos son aquellos cuya red cristalina contiene dos tipos de iones en dos estados de coordinación diferente, y ocurre alineación de los momentos magnéticos en direcciones opuestas de diferente intensidad, resultando una magnetización menor que en los materiales ferromagnéticos. Las propiedades magnéticas de los materiales ferrimagnéticos coinciden con las de los ferromagnéticos, a excepción de la intensidad de su magnetización por unidad de volumen, que ocurre por la coexistencia de dos iones magnéticos diferentes en dichos materiales (Butler, 1992). Al exponerse debajo de la T_C presentan una magnetización remanente y por encima de ella presentan un comportamiento paramagnético; un ejemplo de un mineral ferrimagnético es la magnetita (Fig. 2-3 c).

El antiferromagnetismo

Todos los momentos magnéticos son de la misma intensidad pero los átomos vecinos presentan momentos opuestos. Aunque existe un fuerte acoplamiento de intercambio, tales materiales tienen magnetización cero. En algunos casos, sin embargo, una magnetización débil puede surgir por defectos en la red y vacantes o por situaciones en las que los momentos atómicos están inclinados ligeramente fuera del antiparalelismo perfecto (Evans y Heller, 2003)

Entre las sustancias antiferromagnéticas se encuentran la hematita, ilmenita, goetita, pirrotita, Cr y Mn. Un material con propiedades antiferromagnéticas se caracteriza porque a temperaturas inferiores a una crítica, su magnetización se reduce prácticamente a cero (Butler, 1992); ésta temperatura se denomina Temperatura de Neel (T_N), así, a temperaturas inferiores a la T_N , la energía de permuta es negativa, predomina sobre la energía térmica y da origen a un estado ordenado tal que, la magnetización resultante es nula (Fig. 2-3 c). En estos materiales, a diferencia de los ferrimagnéticos, los momentos de las subredes son iguales y opuestos, aunque en ocasiones el acoplamiento ion-oxígeno no es de 180° y los momentos de las subredes no se cancelan totalmente, originando un ferromagnetismo débil,

perpendicular al eje promedio de los espines y llamado antiferrimagnetismo inclinado (Tauxe et al., 2010).

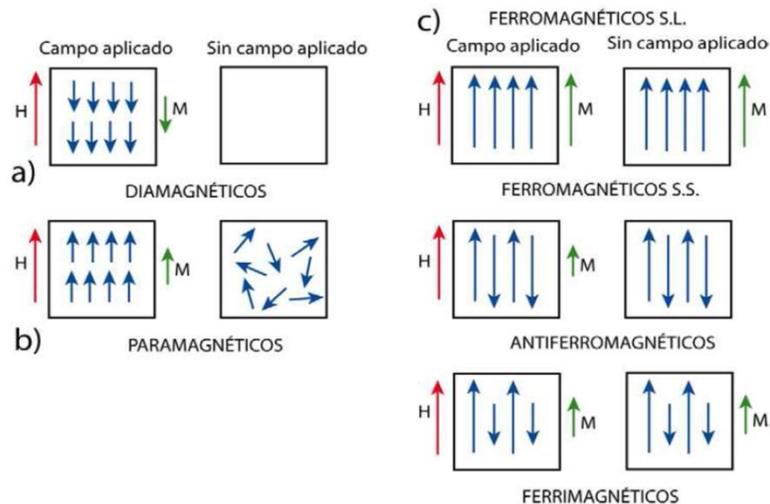


Fig. 2-3. Comportamiento magnético de los materiales

Los minerales ferromagnéticos, es decir, ferri- y antiferromagnéticos, habitualmente presentes en los suelos son óxidos de hierro (magnetita, maghemita, hematita) e hidróxidos de hierro (goetita); están dispersos en forma de partículas finas dentro de una matriz no magnética formada por componentes diamagnéticos (cuarzo, carbonato cálcico, materia orgánica y agua) y minerales paramagnéticos, tanto primarios como secundarios de manera que, en suelos ricos en hierro pero pobres en minerales ferrimagnéticos, los minerales paramagnéticos contribuyen de manera significativa al valor total de la susceptibilidad magnética.

2.1.3 Principales minerales magnéticos: magnetita, maghemita, hematita, oxihidróxidos de hierro y sulfuros de hierro.

El hierro es el elemento de transición más abundante por lo que muchos estudios dependen de minerales que lo contienen. Los principales minerales magnéticos son: la magnetita, maghemita, hematita, oxihidróxidos y sulfuros de hierro. Estos se representan principalmente en un diagrama ternario.

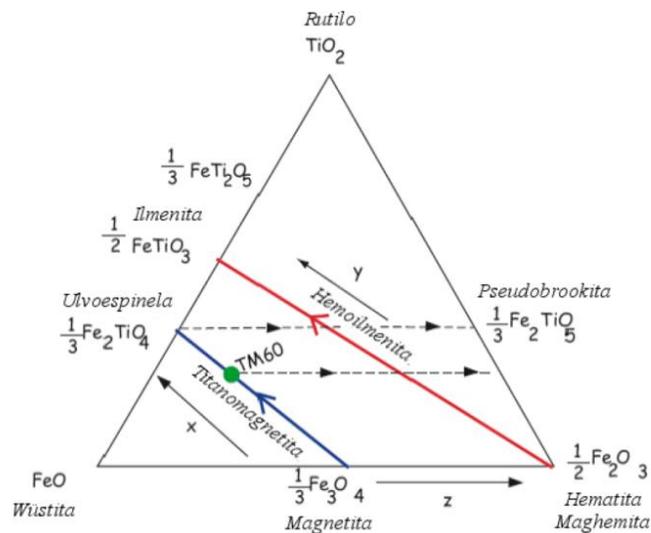


Fig. 2-4. Diagrama que muestra las principales series de minerales magnéticos, con línea azul se representa la serie de las titanomagnetitas, y con línea roja la serie de hemoilmenita, las líneas punteadas indican la oxidación aumentando Z.

Los óxidos de Hierro y Titanio son pertenecientes al grupo de la espinela, que es una estructura cristalográfica flexible con respecto al número de cationes que puede aceptar; en los óxidos de hierro, el titanio, comúnmente sustituye al hierro en la estructura cristalina, debido a que el ion de titanio Ti^{4+} no tiene electrones apareados y posee un tamaño diferente. La titanomagnetita y hemoilmenita cristalizan alrededor de $1300\text{ }^{\circ}C$. Por encima de $600\text{ }^{\circ}C$ aproximadamente, hay solución sólida completa entre magnetita y ulvoespinela, y por encima de $800\text{ }^{\circ}C$ aproximadamente entre hematita e ilmenita. Esto significa que todas las composiciones permiten en su estructura la temperatura de cristalización. A medida que la temperatura disminuye, la estabilidad termodinámica de los cristales cambia. Las composiciones de los minerales se representan en un diagrama ternario como el que se muestra en la Fig. 2-4. Los vértices del diagrama ternario son Fe^{2+} en la parte inferior izquierda, Fe^{3+} en la parte inferior derecha y Ti^{4+} en la parte superior. Los óxidos son FeO (wustita), Fe_2O_3 (hematita o maghemita dependiendo de la estructura) y de TiO_2 (rutilo). Cada punto del diagrama representa una mezcla de soluciones que se suma a un catión (Tauxe et al., 2010).

Magnetita (Fe_3O_4)

Es el mineral magnético más importante en la tierra, se encuentra en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. La magnetita cristaliza en el sistema cúbico con estructura de tipo espinela. Los átomos de oxígeno que forman esta estructura constituyen 14 aniones en el bloque básico de la red cristalina que se encuentra compartiendo con otros siete sistemas cúbicos vecinos formando así de manera colectiva un átomo. Esta estructura posee dos tipos de espacios (tetraédricos y octaédricos) con dos subredes de momentos magnéticos antiparalelos y desiguales; es decir comportamiento ferrimagnético. A temperatura ambiente la magnetización de saturación es de 480 kA/m. Además presenta dos temperaturas importantes que la caracterizan: Temperatura de Curie (T_C) y la transición de Verwey (t_V). La primera se produce a 580°C , temperatura a la cual la energía térmica supera el acoplamiento de cambio y el ferrimagnetismo está perdido; la t_V se produce alrededor de -150°C y marca un cambio en la distribución cristalográfica de los cationes de hierro, de tal manera que el marco previamente cúbico se distorsiona ligeramente a la simetría monoclinica (Evans y Heller, 2003).

Maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)

Su fórmula química es idéntica a la de la hematita, por lo tanto, ambos minerales ocupan la misma posición en el diagrama ternario. Sin embargo, ellos no comparten la misma estructura cristalina o propiedades magnéticas. Para evitar confusión, se introduce un prefijo, siendo la hematita designada como $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ y la maghemita $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, que es simplemente la forma totalmente oxidada de la magnetita. El proceso de oxidación implica iones de Fe bivalentes; dos tercios de ellos tienen su estado de valencia que cambió de Fe^{2+} a Fe^{3+} , y el tercio restante se elimina en su totalidad en la red. Los sitios que eliminan átomos permanecen vacantes, y por lo tanto, tales estructuras se dice que son deficientes en cationes. El cambio de valencia y la pérdida de cationes colectivamente dan como resultado una disminución de la magnetización espontánea a temperatura ambiente a 380 kA/m. La temperatura de Curie ($\sim 645^\circ\text{C}$) es difícil de determinar experimentalmente ya que existe un rango de estimación de $590\text{-}675^\circ\text{C}$; a temperaturas elevadas sufre un cambio cristalográfico

irreversible a hematita con una dramática pérdida consecuente de la magnetización (Evans y Heller, 2003).

Hematita (α -Fe₂O₃)

Este mineral se produce ampliamente en la naturaleza, y es de importancia ambiental. La hematita es un constituyente común en rocas ígneas ácidas y en rocas sedimentarias. La hematita se presenta usualmente en lechos rojos en dos formas como pigmento rojo muy fino o como granos negros de especularita.

La hematita posee estructura cristalina hexagonal que contiene iones de hierro trivalente magnetizados en direcciones casi opuestas. La hematita pasa de un mineral antiferromagnético en uno débilmente ferromagnético con una magnetización espontánea de aproximadamente 2.5 kA/m y una Temperatura de Neel (T_N) de 675 °C. La temperatura de bloqueo (T_B) de un grano es la temperatura a la cual el tiempo de relajación llega a ser lo suficientemente grande para igualar un tiempo de relajación arbitrariamente definido. Por lo tanto, a pesar de ser aproximadamente 200 veces más débil que la magnetita, la hematita es térmicamente más estable. Al enfriarse por debajo de la T_C , la magnetización de hematita se eleva bruscamente a un punto que se mantiene alrededor de -15 °C. Aquí, ocurre la transición de Morin (Morin, 1950), donde la inclinación de las direcciones débiles del ferromagnetismo se pierde (Evans y Heller, 2003).

Oxihidróxidos de hierro: goethita (α -FeOOH), **lepidocrita** (γ -FeOOH)

De los muchos oxihidróxidos de hierro que se producen en la naturaleza, la goethita es la fase magnética más común, y es antiferromagnética. Ocurre ampliamente como un producto de la meteorización de minerales de hierro y como un precipitado directo de soluciones de hierro. Es muy estable bajo muchas condiciones y puede deshidratarse a hematita a una temperatura elevada. Esta deshidratación es generalmente completa a aproximadamente 325°C. Se caracteriza por una muy alta coercitividad, pero una temperatura de Neel en el rango 100-150°C. (Tauxe, 2010).

La lepidocrita es antiferromagnética y menos abundante dentro de los suelos y sedimentos, y presenta una T_N sin remanencia. Su importancia se debe a que puede llegar a deshidratarse fuertemente a maghemita cuando se calienta por encima de 250°C (Dunlop y Özdemir, 1997).

Sulfuros de hierro: greigita (Fe_3S_4) pirrotita (Fe_7S_8)

Hay dos hierro-sulfuros que son importantes para el paleomagnetismo: greigita y pirrotita. La greigita se forma por reducción de sulfatos y es un sulfuro equivalente a la magnetita, es ferrimagnética. Alcanza una T_C alrededor de 330°C. La pirrotita se encuentra en rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas. Presenta un comportamiento ferrimagnético y antiferromagnético. La T_C es aproximadamente 325°C (Tauxe et al., 2010).

2.1.4 Parámetros magnéticos: Susceptibilidad magnética (χ_{lf}), Magnetización Remanente Natural (NRM por sus siglas en inglés), Magnetización Remanente Anhistéretica (ARM)

Susceptibilidad magnética (χ_{lf})

Es la proporción entre la magnetización inducida y el campo aplicado. Depende tanto del tipo de mineral portador de la magnetización como de la concentración del mismo. Los minerales ferrimagnéticos arrojan valores mayores que los antiferromagnéticos. Es un parámetro medible rápidamente tanto en campo como en laboratorio; así, los valores de χ_{lf} se utilizan, en conjunto con otros parámetros magnéticos, para obtener información acerca de la mineralogía tipo de dominio magnético, entre otros

Susceptibilidad magnética dependiente de la Temperatura

Para obtener curvas termomagnéticas de calentamiento y enfriamiento, que muestran forma y temperaturas de decaimiento específicas para cada tipo de mineral magnético. Para esto se utiliza un susceptibilímetro KLY-4 u horno CS-3. A medida que se alcanzan las temperaturas de bloqueo de los granos magnéticos en un

espécimen en particular, la susceptibilidad del grano aumentará por este factor hasta que se alcanza la T_C , momento en el que sólo se exhibe susceptibilidad paramagnética (Tauxe et al., 2010).

Susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia ($\chi_{fd}\%$)

Como su nombre lo indica, es la susceptibilidad del material que depende de la frecuencia del campo aplicado. Para ello se mide la χ_{fd} a baja y alta frecuencia (LF : 0.47 kHz y HF : 4.7 kHz). Este parámetro se utiliza para cuantificar los minerales ferrimagnéticos de grano ultrafino que presentan un comportamiento superparamagnético (SP), ya que cuando aumenta la frecuencia del campo magnético aplicado H , los granos SP pueden comportarse como granos SD y disminuir su susceptibilidad. La determinación de este parámetro se puede calcular mediante:

$$\chi_{fd}\% = \frac{(\kappa_{LF} - \kappa_{HF})}{\kappa_{LF}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2-3}$$

El comportamiento SP depende de la escala de tiempo, por lo tanto, la susceptibilidad dependiente de la frecuencia $\chi_{fd}\%$ se puede utilizar para definir el tamaño de grano de materiales magnéticos (Evans y Heller, 2003).

Magnetización Remanente Natural (NRM)

La NRM es la magnetización contenida en el material estudiado (roca, suelo, sedimento, etc.) antes que éste sea tratado en laboratorio; se puede definir como la suma de magnetizaciones que ha almacenado a lo largo de su historia (Butler, 1992).

Magnetización Remanente Anhistéretica (ARM)

La ARM es un tipo de magnetización inducida en el laboratorio, para determinar, a partir de la coercitividad de la muestra, el tamaño de grano magnético. Para ello, se aplican campos alternos en presencia de un campo directo del orden del campo magnético terrestre, adquiriendo la muestra una remanencia anhistéretica (Tauxe et al., 2010). La ARM afecta a la distribución completa de los granos magnéticos, y es

producida por el campo H_0 , de manera que, la desmagnetización por campos alternos produce el efecto aleatorio en creación de ARM, tal y como lo producen las excitaciones térmicas en el caso de la TRM (magnetización termorremanente).

2.2 Metales pesados

Los metales pesados que se incluyen en los límites máximos permisibles por: México, Estados Unidos de América (E.U.A.) y la Unión Europea (U.E.), consideran las categorías de toxicidad en diferentes niveles de peligro para la salud humana y efectos diversos que ocasionan sobre la biodiversidad. En la Tabla 2-1 se describen algunos de los principales elementos que pueden provocar algunas enfermedades y/o envenenamiento.

Tabla 2-1. Límites máximos permisibles de algunos metales pesados (mgkg^{-1}) establecidos por Normas Oficiales de México, Unión Europea (U.E.) y Estados Unidos de América (E.U.A).

País	V	Co	Ba	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
México	78	-	5400	-	50-100	400	-	280
U. E.	-	-	-	50-140	30-75	50-300	150-300	100-150
E.U.A	-	100	-	750	210	150	1400	1500

El contenido total de metales traza en cualquier suelo depende inicialmente de la naturaleza del material parental debido a que un suelo hereda del mismo determinada provisión de elementos que se redistribuyen por procesos edafológicos (Tabla 2-2) (Ahmed y Rahman, 2000). Los suelos pueden aumentar el contenido de metales pesados debido a la actividad industrial o por el uso de los biosólidos de tratamiento de aguas residuales y diversos subproductos que son aplicados a las tierras como fertilizantes (nitrógeno, fósforo y potasio) en cultivos agrícolas. Los altos niveles de Pb del suelo pueden estar presentes debido a las emisiones producto de la combustión de la gasolina (EPA, 2007).

Tabla 2-2. Concentraciones de metales pesados y sus variaciones en suelos, litosfera y rocas (mgkg⁻¹) en material seco.

Metal traza	Suelos		Litosfera	Rocas			
	Rango usual	Promedio	Promedio	Ígneas	Caliza	Arenisca	Esquisto
Zn	10-300	50	80	80	4-20	5-20	50-3000
Cu	2-100	20	70	70	5-20	10-40	30-150
Fe	14000-40000	-	-	40600	13000	31000	43000
Cr	5-1000	200	200	117	5	10-100	100-400
Co	1-40	8	40	18	0.2-2.0	1-10	10-50
Ni	5-50	40	100	100	3-10	2-10	20-100
Pb	2-200	10	16	16	5-10	10-40	20

Casi todos los organismos vivos requieren de ciertos metales a fin de mantener óptimas su salud y funciones biológicas, sin embargo éstos metales en grandes cantidades ocasionan toxicidad o se convierten en agentes carcinogénicos durante las etapas de desarrollo embrionario como en el caso del periodo de incubación de las tortugas marinas (Tabla 2-3).

Tabla 2-3. Concentraciones de metales pesados (mgkg⁻¹) detectados en huevos de tortuga verde (*Chelonia mydas*). (Eisler, 2010; Storelli y Marcotrigiano, 2003).

	Ba	Cr	Co	Cu	Pb	Zn
Yema de huevo	8.7(4.0-21)	0.94	0.03	0.34 (0.17-0.77)	0.049	-
Albúmina	0.5 (0.08-1.6)	0.054	0.009	0.063	0.005	0.3(0.038-0.75)
Cáscara de huevo	(1.4-8.2)	0.4	3.3 (0.8-5.8)	1.3(0.24-4.2)	0.11	1.2 (0.3-2.6)

2.3 Análisis geoestadístico y Sistema de Información Geográfica

El término geoestadística se define como: “la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de los fenómenos naturales” (Matheron, 1962). Al igual que ocurre con el resto de los modelos matemáticos la geoestadística establece un conjunto de hipótesis, y las desarrolla hasta obtener unas conclusiones. Si la simulación de un modelo produce soluciones coherentes y

aceptables a los problemas que se observan en la realidad se puede interpretar y estipular que dicho modelo es válido (Journel y Huijbregts, 1978).

La geoestadística intenta modelar, con herramientas estadísticas propias los hechos de la naturaleza, mismos hechos que no tienen un origen aleatorio; la cuantificación de esta incertidumbre espacial requiere de un modelo que especifique el mecanismo por el cual se genera la aleatoriedad espacial de los fenómenos naturales. La variable que describe este tipo de hechos se le denomina: Variable regionalizada (Matheron, 1962). Uno de los principales propósitos, a los que la geoestadística intenta responder es conocer el valor de la variable regionalizada en un punto donde los parámetros no fueron medidos mediante la dependencia espacial de los puntos de medición.

Con los datos georeferenciados es permitido medir las características implícitas asociadas al espacio geográfico donde se tomaron las muestras y que portan de un interés en el estudio. Así, es posible hacer uso de los sistemas de información geográfica (SIG) debido a que se han supuesto nuevos análisis de la distribución espacial aplicada a las ciencias ambientales. Cabe aclarar que un SIG es un conjunto de programas informáticos que sirven para captar, almacenar, transformar, mostrar y analizar diversos tipos de datos espaciales (Burrough y McDonnell, 1998).

2.4 Norma Oficial Mexicana (NOM)

El presente trabajo se sustenta además en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y los rangos permisibles que se han establecido, cuyos lineamientos y especificaciones son determinados para diferente finalidad. En estudios relacionados con temas de contaminación se ha utilizado la NOM-057-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio. Además, la NOM-004-SEMARNAT-2002, de Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. La NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece

especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo; estudios, muestreos y análisis.

Para otros fines relacionados con conservación y preservación del medio ambiente y/o ecosistemas se han establecido las Normas: NOM-131-SEMARNAT-2010 y NOM-059-SEMARNAT 2010. Por el mal aprovechamiento no extractivo de especies que debe tomar en cuenta un plan de manejo, que deben ajustarse los prestadores del servicio, protección y la conservación de su hábitats que enmarcan.

La NOM-131 que establece que tanto las áreas naturales protegidas como la zona comprendida en la franja de dos kilómetros de la costa hacia mar abierto, son zonas restringidas para la observación de fauna silvestre, y en lo que se refiere a la NOM 059, enlista especies bajo la categoría de “protección especial”.

Estos lineamientos contribuyen a la protección y cuidado del medio ambiente y la conservación de sus hábitats, mismos que cumplen una función específica en los ecosistemas colaborando al equilibrio ecológico. Mientras disminuya el impacto ambiental crece la posibilidad de disminuir problemas relacionados con el deterioro ambiental y la contaminación del mismo.

2.5 Área de estudio

2.5.1 Localización

El área de estudio se encuentra en la región costa del municipio de Lázaro Cárdenas, Michoacán. En el siguiente mapa se ubican los puntos de muestreo para polvo urbano y suelo superficial de la ciudad y los sitios donde fueron extraídos los núcleos de sedimentos costeros (Fig. 2-5).

El municipio de Lázaro Cárdenas se ubica al Sureste del estado de Michoacán, México. Limita al Norte con Arteaga, al Oeste con Aquila, al Sur con el Océano Pacífico y al Este con Guerrero; sus coordenadas geográficas son 17°54'58" latitud Norte y 102°10'22" longitud Oeste. Tiene una superficie de 2'468,168 m² que representa el 1.83% del estado (APILAC, 2009).

Cuenta con una población total de 178 817 habitantes, mismos que se encuentran distribuidos en las localidades pertenecientes al municipio de Lázaro Cárdenas: Las Guacamayas, La Orilla, La Mira, Buenos Aires y Playa Azul (INEGI, 2012).

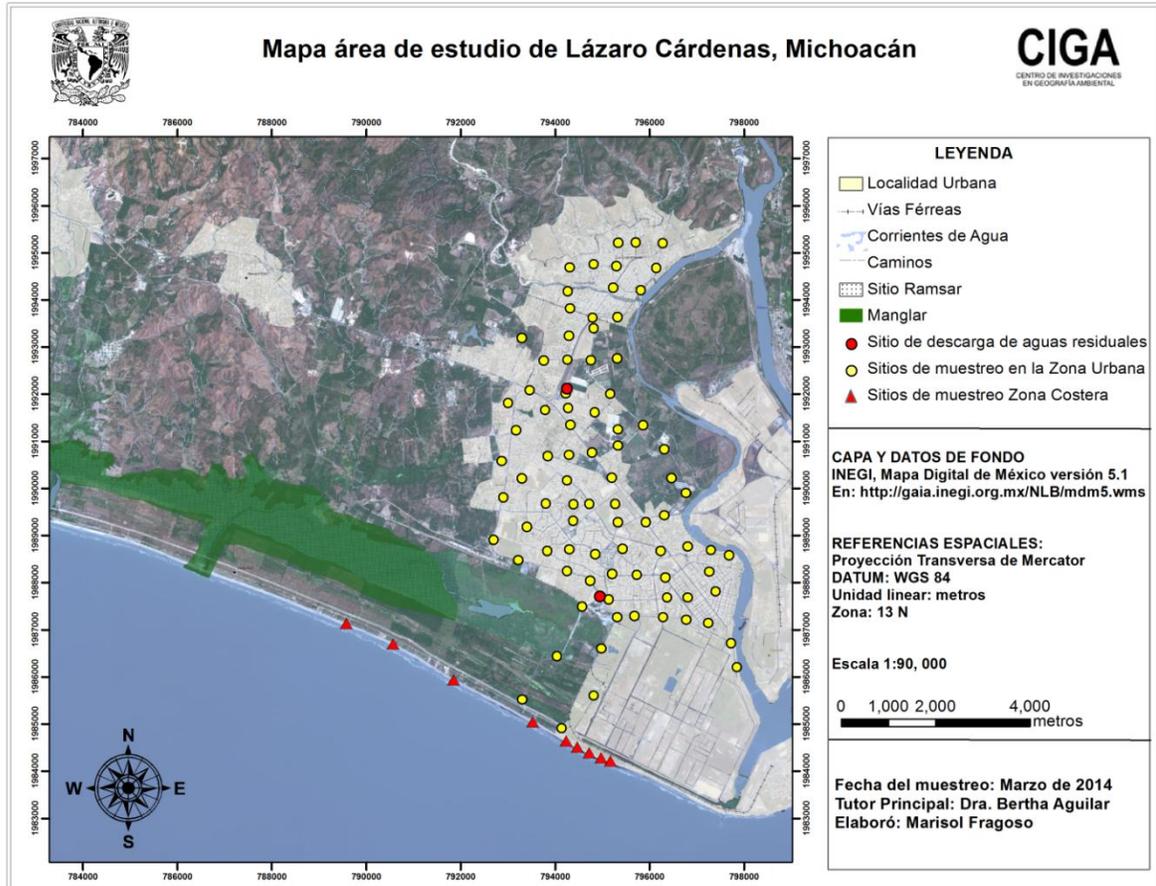


Fig. 2-5. Mapa de localización la ciudad de Lázaro Cárdenas, Michoacán y la ubicación de las zonas urbana y costera, donde se sitúan los puntos de muestreo.

2.5.2 Clima y condiciones meteorológicas

La costa de Lázaro Cárdenas presenta un clima Aw con lluvias en verano (tropical con invierno seco) con algún mes por debajo de 60 mm y si la precipitación del mes más seco es inferior a la fórmula $[100 - (\text{Precipitación anual} / 25)]$. Este tipo de clima se da en algunas regiones tropicales del continente americano, en la sabana de África subsahariana, oriental y meridional, en el subcontinente indio, en el Sudeste asiático y en el Norte de Australia, que pertenece al mes más seco de los subhúmedos con lluvias en verano de acuerdo a la clasificación de Köppen. Con una precipitación

anual promedio de 600 a 800 mm, una precipitación mínima de 560 y la máxima de 1,279 mm anuales; la oscilación térmica anual se da entre 5° y 7° y una marcha de temperatura anual tipo Ganges (García, 1988).

2.5.3 Geología

El municipio se encuentra compuesto por rocas: Ígnea intrusiva (granito 26.47% y tonalita 0.17%), Ígnea extrusiva (andesita-toba intermedia 18.00% y andesita 0.08%) y roca sedimentaria (arenisca-conglomerado 7.73%, caliza 4.63%, caliza-lutita (Fig. 2-6).

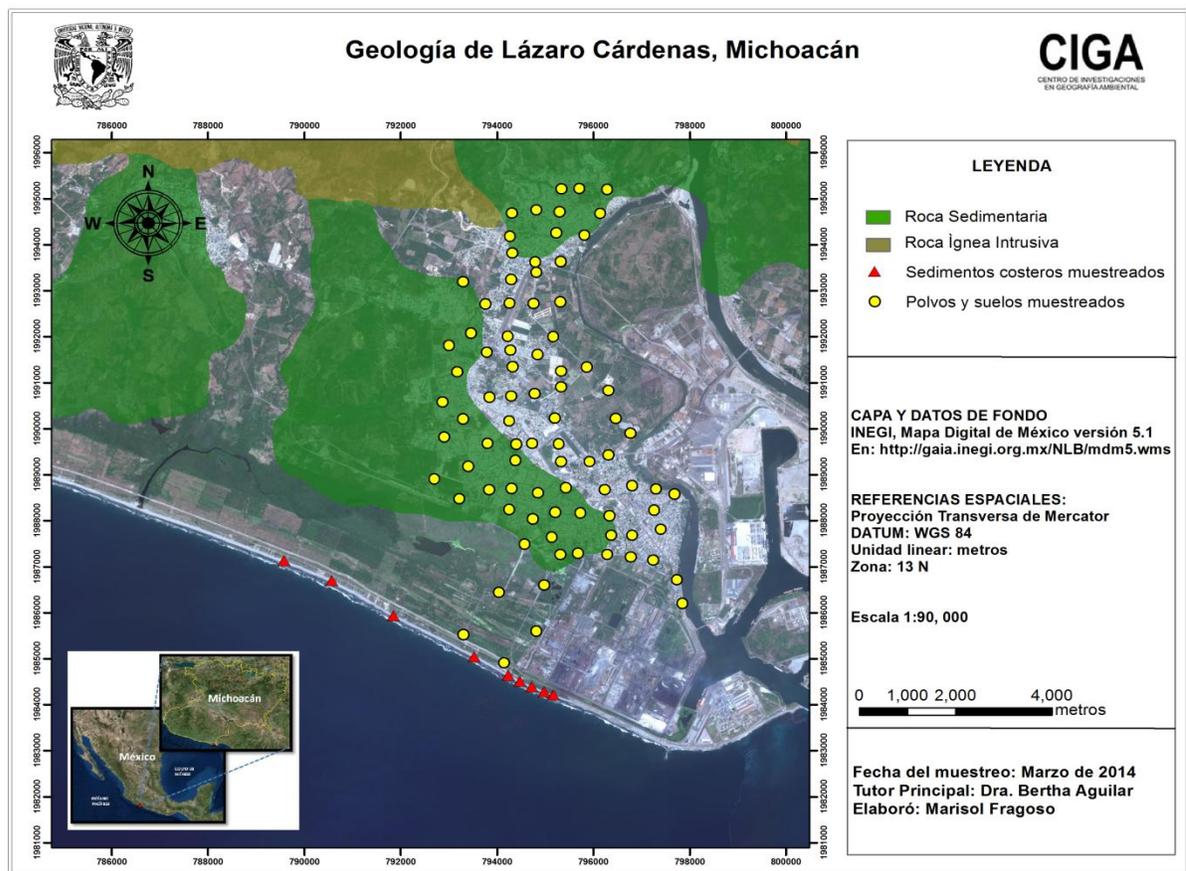


Fig. 2-6. Mapa de la Geología de Lázaro Cárdenas, Michoacán.

2.5.4 Edafología

Los principales grupos de suelo que presenta el municipio de Lázaro Cárdenas son: Regosol, Phaeozem, Luvisol, Gleysol, Arenosol, Cambisol y Fluvisol (Fig. 2-7). Los

sitios de muestreo de las zonas urbana y costera pertenecen principalmente a los grupos Phaeozem, Luvisol, Gleysol, Arenosol y Regosol (Tabla 2-4).

Tabla 2-4. Resumen de los grupos de suelo presentes en la zona de estudio (WRB, 2006).

Grupos de Suelo	Connotación	Material Parental	Ambiente
Regosoles	Suelos débilmente desarrollados en material no consolidado; del griego <i>rhegos</i> , manta.	Material no consolidado de grano fino.	Todas las zonas climáticas sin permafrost y todas las alturas. Los Regosoles son particularmente comunes en áreas áridas (incluyendo el trópico seco) y en regiones montañosas.
Phaeozems	Suelos oscuros ricos en materia orgánica; del griego <i>phaios</i> , oscuro, y ruso <i>zemlja</i> , tierra.	Materiales no consolidados, predominantemente básicos, eólicos (loess), till glaciario y otros.	Cálido a fresco (e.g. tierras altas tropicales) regiones moderadamente continentales, suficientemente húmedas de modo que la mayoría de los años hay alguna percolación a través del suelo, pero también con períodos en los cuales el suelo se seca; tierras llanas a onduladas; la vegetación natural es pastizal como la estepa de pastos altos y/o bosque.
Luvisoles	Suelos con una diferenciación pedogenética de arcilla entre un suelo superficial con menor y un subsuelo con mayor contenido de arcilla con alta actividad y alta saturación; del latín <i>luere</i> , lavar.	Una amplia variedad de materiales no consolidados incluyendo till glaciario, y depósitos eólicos, aluviales y coluviales.	Principalmente tierras llanas o suavemente inclinadas en regiones templadas frescas y cálidas (e.g. Mediterráneas) con estación seca y húmeda marcadas.
Gleysoles	Suelos con signos claros de influencia del agua freática; del ruso <i>gley</i> , masa lodosa.	Un amplio rango de materiales no consolidados, principalmente fluviales, marinos y lacustres del Pleistoceno u Holoceno, con mineralogía básica a ácida.	Áreas deprimidas y posiciones bajas del paisaje con agua freática somera.
Arenosoles	Suelos arenosos; del latín <i>arena</i> , arena.	No consolidado, en algunos lugares materiales translocados, calcáreos, de textura arenosa; ocurren áreas relativamente pequeñas de Arenosoles sobre rocas silíceas extremadamente meteorizadas.	Desde árido hasta húmedo y perhúmedo, y desde extremadamente frío hasta extremadamente cálido; las geoformas varían desde dunas recientes, cordones de playa, y planicies a plateaus muy antiguos arenosos; la vegetación varía desde vegetación de desierto hasta bosque ligero.
Cambisoles	Suelos con por lo menos un principio de diferenciación de horizontes en el subsuelo evidentes por cambios en la estructura, color, contenido de arcilla o contenido de carbonato; del italiano <i>cambiare</i> , cambiar.	Materiales de textura media a fina derivados de un amplio rango de rocas.	Terrenos llanos a montañosos en todos los climas; amplio rango de tipo de vegetación.
Fluvisoles	Suelos desarrollados en depósitos aluviales; del latín <i>fluvius</i> , río.	Predominantemente depósitos recientes, fluviales, lacustres y marinos.	Planicies aluviales, abanicos de ríos, valles y marismas costeras en todos los continentes y en todas las zonas climáticas; muchos Fluvisoles se inundan periódicamente.

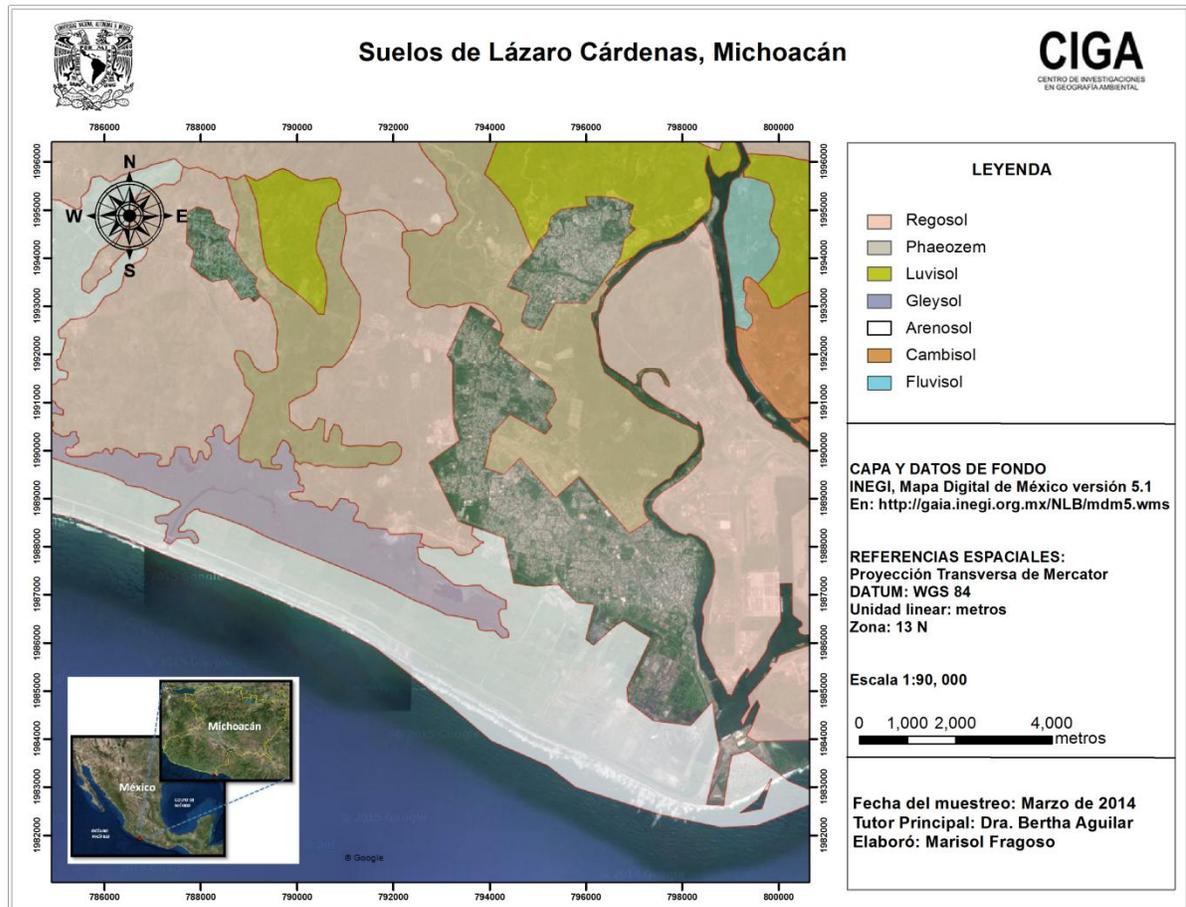


Fig. 2-7. Mapa de grupos de suelo de Lázaro Cárdenas, Michoacán.

2.5.5 Hidrología

El Delta del río Balsas es el principal cuerpo de agua dulce del municipio que cruza los estados de: México, Tlaxcala, Puebla, Oaxaca, Morelos, Guerrero, Michoacán y Jalisco. Se ubica entre los paralelos 17°00' y 20°00' de latitud Norte y los meridianos 97°30' y 103°15' de longitud Oeste de Greenwich; esta cuenca tiene una superficie hidrológica total de 117,406 km² y se divide en alto, medio y bajo Balsas (CONAGUA, 2010).

El sitio Ramsar Laguna el Caimán, conformado por los esteros: Mata de Carrizo, Santa Ana y El Pichi, presenta dos comunicaciones con el mar conocidas como la Barra de Santa Ana y la Barra de Pichi (Fig. 2-8).

En el puerto de Lázaro Cárdenas se han construido tres canales artificiales para dar acceso a los buques en los muelles de Metales y Minerales: Terminal de Usos Múltiples, Terminales de Contenedores y Terminal Portuaria del Pacífico (SEMARNAT, 2010).

Las corrientes predominan al Suroeste del estado, y la dirección del mar es dominante del Oeste con una fuerza mínima. El oleaje promedio es de 0.5 a 2.5 m presentando las máximas alturas entre los meses de mayo a noviembre.

La región de litoral Michoacano para el Océano Pacífico Oriental Tropical, está influida por tres sistemas de corrientes: la corriente de California, la Norecuatorial y la deriva de Costa Rica, que son parte de la gran circulación del Pacífico Norte y las cuales son impulsadas por los vientos alisios del Sureste (Correa, 1974).

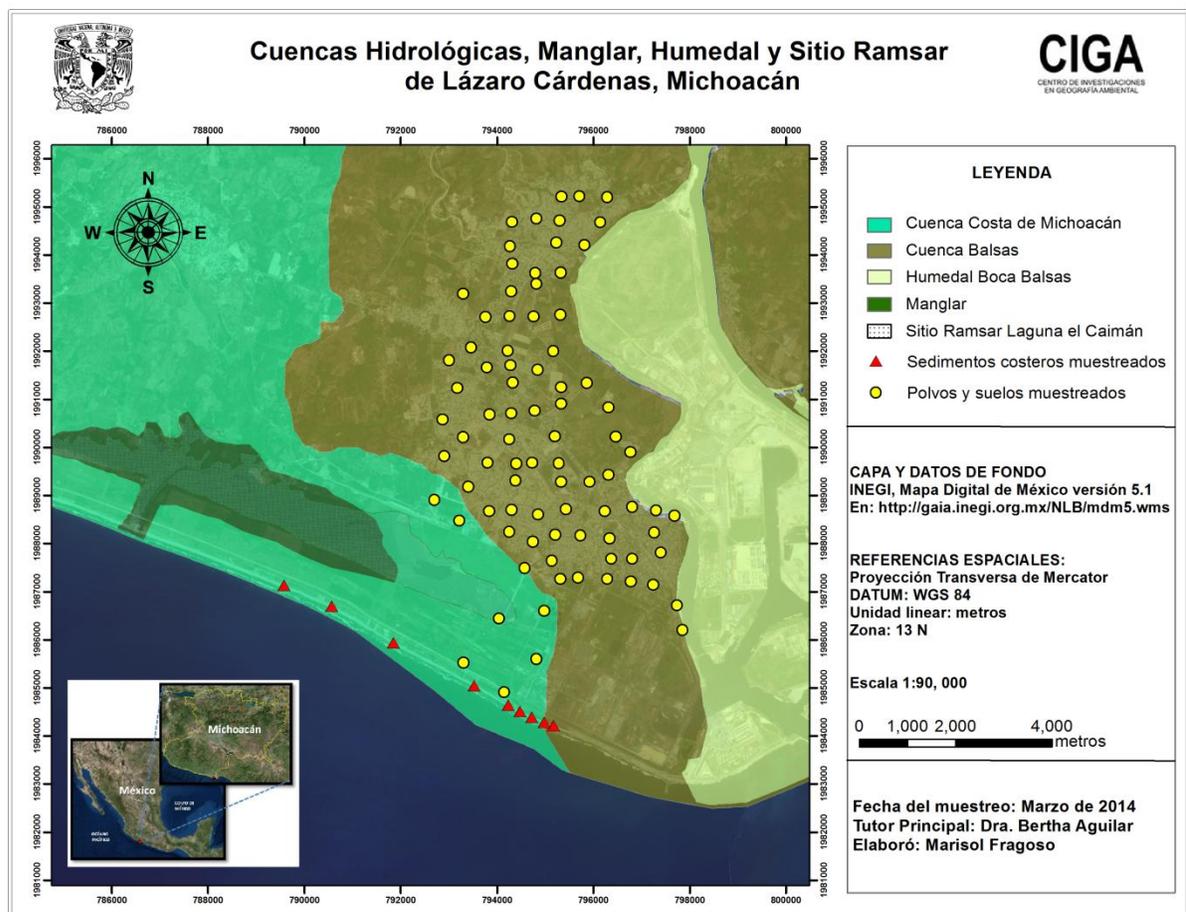


Fig. 2-8. Mapa de la Hidrología de Lázaro Cárdenas, Michoacán.

2.5.6 Flora

La cubierta vegetal de la región costera del Estado de Michoacán, está constituida por cinco tipos de asociaciones: Bosque Tropical Caducifolio, Bosque Tropical Subcaducifolio, Manglar, Asociaciones de Dunas Costeras y Palmar (González, 1981).

La zona costera de Michoacán adyacente a la Sierra Madre del Sur es considerada como una de las regiones florísticas más ricas del mundo. El tipo de vegetación dominante es el Bosque Tropical Caducifolio y Subcaducifolio. Presenta un número relativamente elevado de especies endémicas aunque algunas de ellas penetran también en la depresión del Balsas. En la depresión del Balsas el Bosque Tropical Caducifolio es el tipo de vegetación más extendido y las especies preponderantes son el género *Bursera*. Abundan las palmeras (*Cocos nucifera*), seguidas de especies sobresalientes como: el pinzán (*Pithecellobium dulce* y *Phitocellobium lanceolatum*), tepeguaje (*Lysiloma acapulcense*), el huizache (*Acacia spp*) , los cactus (*Opuntia spp*), parota (*Enterolobium cyclocarpum*), fresno (*Fraxinus sp*), sauce (*Salix sp*), zapote (*Casimiroa sp* y *Diospyros sp*) y algunos cultivados como, mango (*Mangifera sp*), plátano (*Musa sp*) y el chico (*Manilkara sp*), (Rzedowski, 1988).

2.5.7 Fauna

La ciudad de Lázaro Cárdenas posee una diversidad biológica importante debido a la presencia de ambientes terrestres, riparios, costeros y humedales, que habitan diferentes especies de anfibios, reptiles, aves y mamíferos. Cabe mencionar que hay especies de aves y reptiles bajo la categoría de protección especial, (NOM-059) tales como: *Chelonia Agassizii*, *Ctenosaura pectinata*, *Iguana iguana*, *Crocodylus acutus*, por mencionar algunas especies de fauna silvestre.

2.5.8 Actividades económicas

Con la llegada de la industria siderúrgica, Lázaro Cárdenas fue considerado como una pieza esencial del Programa de Puertos Industriales para desarrollar y fomentar el surgimiento de nuevos polos de desarrollo (SCT, 2006). Es el puerto con mayor impacto para el Pacífico y reconocido a nivel nacional por su conexión con el Sur de los Estados Unidos (APILAC 2013). Su infraestructura se desglosa de la siguiente manera:

Terminales de metales, minerales, aceros, fertilizantes, gráneles agrícolas, carbón y petróleos. Contenedores I, Terminal de usos múltiples I y II, y un patio de almacenamiento para automóviles (APILAC 2013).

Por otra parte Lázaro Cárdenas dispone además de atractivos turísticos como: Playa Azul, Playa Eréndira y un bosque de manglar. Cabe señalar que en estos sitios también se práctica la pesca para el comercio y se ofrecen algunos recorridos turísticos para observar desoves de tortugas marinas, cocodrilos y diversas especies de aves que anidan en la zona.

Cabe mencionar que en la playa y el Delta del río Balsas frecuentemente se lleva a cabo el tránsito de embarcaciones de pesca por la mañana de 5:00 a 7:00 y por la tarde de 16:00 a 20:00 hrs. De las actividades económicas ya mencionadas: industria (minera, comercio nacional e internacional), turismo y pesca, le sigue la agricultura y la ganadería con menor peso.

2.5.9 Uso de suelo urbano

El mapa de uso de suelo que se encuentra clasificado para la ciudad de Lázaro Cárdenas por la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) incluye los siguientes tipo de uso: Industrial, Corredor Urbano, Habitacional de densidad baja, Habitacional de densidad media, Habitacional de densidad alta y Mixto (Fig. 2-9).

Sin embargo, durante el muestreo se anotaron las observaciones realizadas en campo y se determinaron los siguientes usos de suelo: Industrial, Residencial

(englobando a el área de uso habitacional de densidad baja, media y alta), Agrícola, Áreas verdes, Equipamiento, Comercial y Mixto.

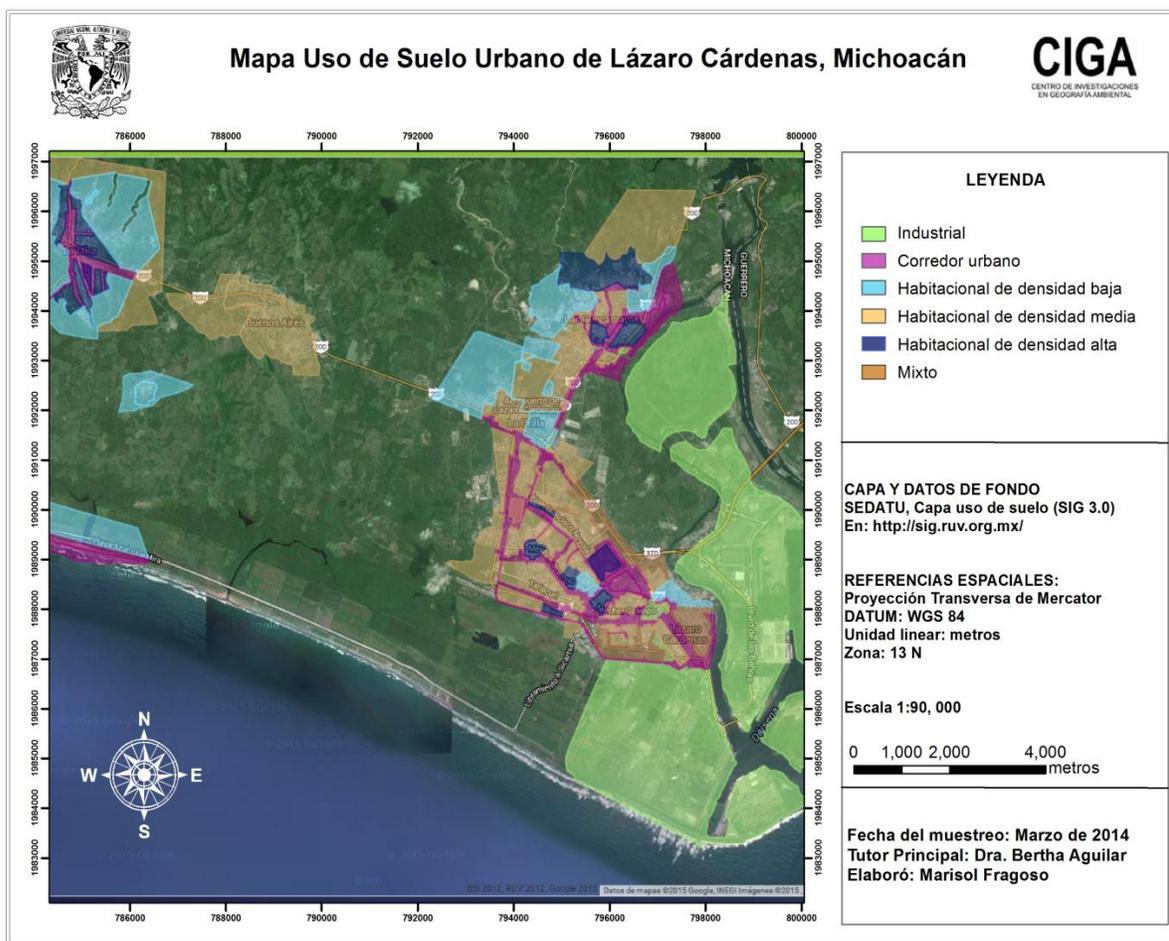


Fig. 2-9. Mapa de uso de suelo urbano de Lázaro Cárdenas, Michoacán.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Polvo urbano y Suelo superficial

3.1.1 Muestreo

Se elaboró un mapa para la planeación del muestreo, que constó de una malla cuadriculada de 500 m² aproximadamente, en la que se distribuyeran homogéneamente los puntos para alcanzar a cubrir un área mayor de la zona urbana de Lázaro Cárdenas, y así obtener la cantidad de muestras necesarias que se requieren en la elaboración de los mapas geoestadísticos.

El muestreo en la zona urbana se llevó a cabo en el periodo del 9 al 18 de marzo de 2014 en temporada de secas para evitar que las lluvias limpiaran el material (polvo) que se iba muestrear de las superficies de la ciudad. Se siguieron los siguientes pasos:

Localización de puntos georreferenciados distribuidos en el mapa de la ciudad de Lázaro Cárdenas. La Georreferencia fue determinada con un receptor GPS bajo el sistema de coordenadas UTM con datum WGS84, zona 13 N.

En cada punto se realizó muestreo para Polvo y Suelo.

a) Polvo urbano

- Se delimitó un cuadrante dependiendo del material disponible sobre la superficie de: cemento, adoquín, asfalto y terracería; se colectó en un área de 1 m² en caso de que el material disponible era escaso y en 0.50 m² si había suficiente material en el sitio (Fig. 3-1a).
- La colecta de polvo urbano se realizó con una brocha y una espátula de plástico dentro del cuadrante delimitado.
- Una vez barrido el polvo sobre el cuadrante localizado en el sitio seleccionado y georreferenciado, el material fue etiquetado y se depositó dentro de una bolsa de plástico.
- Durante el muestreo se tuvo el cuidado de utilizar los materiales limpios para evitar contaminación entre muestras.

- Se obtuvo un total de 85 muestras de polvo en los distintos usos de suelo identificados en la ciudad: Industrial, Residencial, Agrícola, Áreas Verdes, Equipamiento, Comercial y Mixto.
- Los criterios que se tomaron en cuenta para definir los usos de suelo urbano, fueron la observación en campo, en contraste con la información de una base de datos que presenta la Secretaria de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) en un SIG en línea (enlace: <http://sig.ruv.org.mx/>). Cuando se tenía la combinación de dos o más usos de suelo en un mismo sitio, se decidía por el uso de suelo más cercano al punto muestreado.
- En el laboratorio se tamizaron las muestras de polvo en una malla de 2 mm para retirar los excedentes de restos de plantas, rocas y otros residuos sólidos ajenos a la muestra, posteriormente se fijaron en cubos de plástico de 11 cm³ (Fig. 3-1b y c).
- Se pesaron todos los cubos correspondientes a las muestras de polvo.
- Se continuó con el análisis de los distintos parámetros magnéticos.

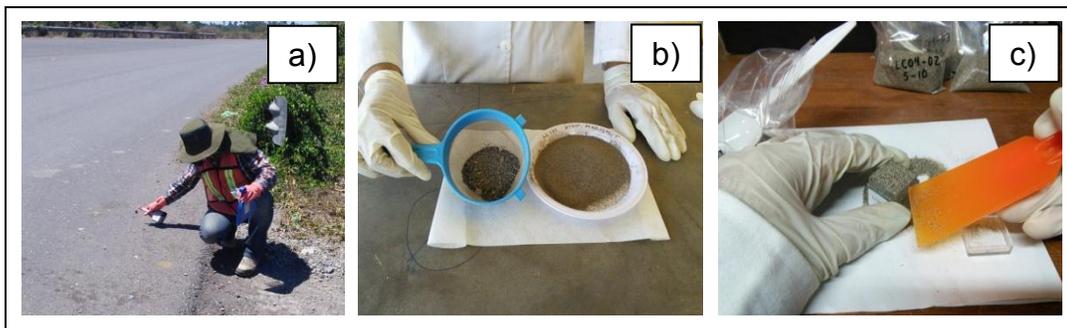


Fig. 3-1. Muestreo y preparación de polvo urbano. a) Colecta de muestra sobre carretera, b) Tamizado de polvo para retirar los materiales ajenos a la muestra, y c) Introducción de la muestra de polvo previamente tamizado al cubo de plástico.

b) Suelo superficial

- En el mismo sitio muestreado de polvo se realizó el muestreo de suelo en un área que permitiera coleccionar la muestra contenida en: macetas de árboles, camellones, parques, cultivos agrícolas, jardineras, áreas verdes etc.
- La extracción de suelo superficial se realizó con un cilindro de plástico (PVC), una tabla de madera y un martillo. En la superficie del suelo se colocaba el

cilindro de plástico cubierto por la tabla de madera y con el martillo era introducido a una profundidad de 5 cm (Fig. 3-2 a, b y c).

- En los sitios de muestreo que pertenecían a áreas verdes y que presentaban la menor influencia antrópica, se optó por tomar muestras adicionales de control, para contar con muestras testigo de la región, sin depósitos recientes de contaminantes y menos perturbador por la actividad humana. Este tipo de muestras se extrajeron con un nucleador a una profundidad de 30 cm.
- En el laboratorio se pusieron a secar las muestras de suelo durante siete días a la sombra para evitar la descomposición de la materia orgánica presente (Fig. 3-2c). Una vez seco el suelo, se trituraron los agregados en un mortero de porcelana (Fig. 3-2d), y posterior a esto se tamizaron en una malla de plástico con aberturas de 2 mm (Fig. 3-2e) para después introducir las muestras en los cubos de plástico de 11 cm³.
- Se pesaron las 89 muestras de suelo que se obtuvieron (85 muestras superficiales y 4 muestras control) y después se continuó con el análisis de parámetros magnéticos.



Fig. 3-2. Muestreo y preparación de suelo superficial. a) Colecta de suelo control en áreas verdes, b) Colecta de suelo superficial en áreas verdes, c) Suelo muestreado, d) Secado del suelo en el laboratorio, e) Trituración de muestras de suelo con el mortero, y f) Tamizado de suelo para después introducirlo a cubos de plástico.

3.1.2 Equipo y parámetros magnéticos medidos en el laboratorio

Los parámetros magnéticos se realizaron en el Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA) del Instituto de Geofísica UNAM, campus Morelia, Michoacán, y el Laboratorio de Paleomagnetismo del Departamento de Física de la Universidad de Burgos, España.

3.1.2.1 Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética se midió a baja y alta frecuencia (χ_{lf} , χ_{hf}) para todas las muestras correspondientes a la zona urbana con el susceptibilímetro (Fig. 3-9b Bartington magnetic susceptibility meter); esta información se utilizó como criterio de selección para identificar muestras con los valores más elevados de este parámetro que presentaban los distintos usos de suelo, para posteriormente identificar las concentraciones de metales pesados en dichas muestras seleccionadas. Con la finalidad de relacionar estos valores extremos con fuentes puntuales de contaminación, dichas muestras se sometieron a experimentos adicionales como susceptibilidad magnética dependiente de la temperatura (k-T) y adquisiciones de ARM.

3.1.2.2 Susceptibilidad magnética dependiente de la temperatura (k-T)

La obtención de las curvas k-T implica la destrucción de la señal magnética e involucra alteraciones y/o transformaciones químicas. Durante el proceso, las muestras son calentadas desde una temperatura ambiente hasta alcanzar temperaturas que sobrepasan la Tc de los minerales que portan la magnetización; al ser alcanzada la temperatura de 700 °C se sometieron a enfriamiento a una velocidad de 3° C / min. La Tc se calculó mediante la diferenciación de la curva de calefacción. Se utilizó un susceptibilímetro modelo KLY-4 Kappabridge en combinación con un horno CS-3, para el rango de temperaturas 40 - 700°C, y un instrumento CLS, para el rango de temperatura -200 a 0°C (Fig. 3-3); estos instrumentos permiten el aumento y descenso de la temperatura en la submuestra medida. El calentamiento se realizó en atmósfera de Argón para evitar los procesos de oxidación del mineral durante el calentamiento.

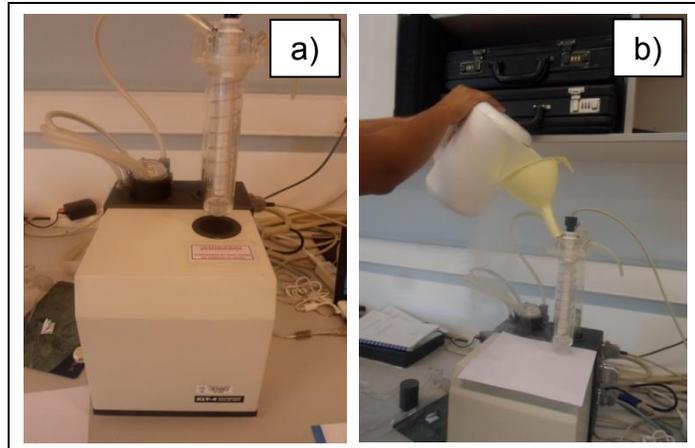


Fig. 3-3. Equipo de laboratorio: a) Susceptíbilmetro Kappabridge KLY-4
b) Aplicación de Nitrógeno líquido.

Las curvas κ -T de enfriamiento con Nitrógeno líquido se midieron usando este equipo aumentando la temperatura desde $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La dependencia de los materiales paramagnéticos con la temperatura es descrita a través de la ley de Curie:

$$\kappa(T) \propto \frac{1}{T}$$

A partir de estas mediciones se pueden obtener las curvas κ -T de calentamiento y enfriamiento, así como otros parámetros de interés: como el grado de reversibilidad de las mediciones, la T_c , la presencia de picos Hopkinson, entre otros (Hrouda, 1994; Tauxe, 2010).

En los minerales paramagnéticos, la relación entre κ y T, se ajusta a una hipérbola que viene definida por la ley de Curie-Weiss: $K_p = C/T$, donde K_p es la susceptibilidad paramagnética, C es la constante de Curie del mineral y T la temperatura absoluta en grados Kelvin. En los minerales ferromagnéticos, la identificación mineral a partir de las curvas κ -T está basada en la determinación de la T_c (o Temperatura de Néel T_N , en minerales antiferromagnéticos), que marca la transición entre el comportamiento ferromagnético y paramagnético: cuando un mineral supera su T_c o T_N ($T_c = 575^{\circ}$ para la magnetita, 320° para la pirrotina o greigita, $T_N = 675^{\circ}$ para la hematita) se produce un descenso brusco en su

susceptibilidad. Además, los minerales ferromagnéticos pueden sufrir variaciones a baja temperatura en su estructura cristalográfica, como la transición de Verwey en la magnetita o la transición de Morin en la hematita (Verwey, 1939).

3.1.2.3 Magnetización Remanente Natural (NRM)

La NRM se midió en todas las muestras de Polvo y Suelo urbano, utilizando el magnetómetro criogénico 2G (Fig. 3-4 a).

3.1.2.4 Magnetización Remanente Anhistéretica (ARM)

Se obtuvieron curvas de adquisición de ARM aplicando campos alternos de acuerdo a la siguiente serie de pasos: 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 y 100 mT en presencia de un campo directo de 0.05 mT. Lo anterior se realiza con el propósito de remagnetizar las muestras, de acuerdo a la coercitividad de los minerales magnéticos presentes; los granos magnéticos se desmagnetizaron secuencialmente de menor a mayor coercitividad, adquiriendo una nueva magnetización según la dirección del campo directo. Las partículas magnéticas de grano fino (SD) tienen gran capacidad para retener este tipo de remanencias. Además, las curvas obtenidas, brindaron información acerca del tipo del mineral (con baja o alta coercitividad), (Fig. 3-4b). Estas curvas se realizaron para un conjunto de muestras seleccionadas. Al resto de las muestras se les aplicó tan sólo el campo pico de 100 mT. Las medidas se realizaron con un magnetómetro criogénico 2G al que se le acopló el módulo de ARM.

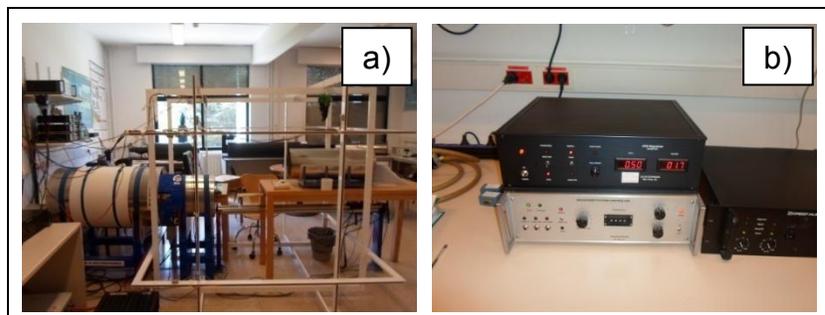


Fig. 3-4. Equipo de laboratorio: a) Magnetómetro criogénico superconductor 2G 755 con brazo de portamuestras automático (rodeado por la bobina de Helmholtz) y b) Desmagnetizador por campos alternos e inductor de ARM.

3.1.2.5 Metales pesados

El contenido total de los metales pesados se determinó mediante el análisis químico realizado en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del LUGIS en el Instituto de Geología UNAM, campus DF. Los gránulos se prepararon con C-cera micro-polvo como agente aglutinante. Las mediciones se realizaron con la ayuda del Software TRAZA09.QAN en un espectrómetro secuencial automatizado Siemens SRS 3000.

La selección de los sitios para el análisis de FRX se realizó con el mismo criterio que anteriormente se estuvo utilizando, tomando la distribución en distintos usos de suelo y los diferentes valores (alto, medio y bajo) de χ_{if} , que ayudaran a encontrar información de las distintas concentraciones de metales pesados, ya que la finalidad de este estudio fue optimizar ahorrando tiempo y dinero al evitar realizar el análisis de FRX en todas las muestras colectadas de la ciudad.

3.1.2.6 Análisis de laboratorio

En la Tabla 3-1 se especifica el número de muestras en las que se midieron los diferentes parámetros magnéticos. Para la selección de muestras en las que se determinaría cada parámetro magnético se tomó en cuenta la ubicación espacial y los distintos usos de suelo, con el fin de obtener valores representativos de las diferentes fuentes puntuales de contaminación. La selección de muestras para análisis de FRX se basó principalmente en los valores más altos de susceptibilidad magnética obtenidos.

Tabla 3-1. Número de muestras analizadas en el laboratorio para polvo y suelo urbano.

Análisis físicos y químicos	Polvo (total 85)	Suelo (total 85)	Suelo Control (total 4)
χ_{hf} , χ_{if}	85	85	4
NRM	85	85	4
ARM (sólo campo pico de 100 mT)	85	85	4
ARM (curvas completas: 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 y 100 mT)	7	6	1
k-T	7	6	1
FRX	17	17	1

3.1.3 Análisis de datos

Las muestras con datos georreferenciados pueden presentar dependencia o independencia espacial, lo cual es clave para distinguir cuidadosamente el modelo de la realidad que se pretende captar. Se estudiaron los datos muestreados realizando un análisis exploratorio de los datos de χ y ARM de Polvo y Suelo urbano. En la primera etapa del análisis geoestadístico se realizó una transformación logarítmica con el desplazamiento necesario (*offset*) para que estos mostraran una mayor normalidad y lograr el mejor ajuste a los semivariogramas experimentales. Cabe señalar que la probabilidad no existe en la realidad sino sólo en los modelos experimentales, por ello debemos tomar en cuenta que los modelos tienen sus limitantes y representan la realidad hasta un cierto punto.

La variabilidad espacial siempre ha sido una incertidumbre a la hora de cuantificar y modelar, esto se puede deducir a partir del análisis estructural: Aquí la herramienta fundamental es el variograma que describe estadísticamente cómo los valores en dos puntos se vuelven diferentes a medida que aumenta la distancia que los separa. En esta fase del análisis estructural se calcula el variograma experimental que representa la variabilidad espacial y el ajuste del variograma teórico de los datos obtenidos del parámetro seleccionado (Moreno, 2009). Durante esta etapa del análisis se descartó la existencia de anisotropía y se optó por el modelo isotrópico, además se seleccionó el semivariograma más apropiado, de acuerdo con (Isaaks and Srivastava, 1990), que debe ser esférico o exponencial. El variograma fundamentalmente debe mostrar el esquema con la mejor precisión (Fig. 3-5).

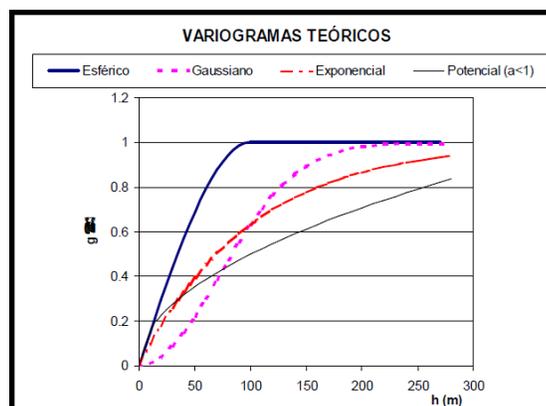


Fig. 3-5. Variogramas teóricos (García, 2009)

Uno de los principales propósitos que la geoestadística intenta lograr es el conocer el valor de la variable regionalizada en un punto donde los parámetros no fueron medidos mediante la dependencia espacial de los puntos de muestreo. Esta estimación se espera que sea precisa, sin sesgo mediante el procedimiento de Kriging.

Las razones por la que se realizó este procedimiento permiten predecir, interpolar y estimar la ubicación de los puntos muestreados y medidos a diferencia de otros métodos en los que se intenta describir a la variable mediante una ecuación matemática prefijada. Aquí la información es completamente estadística y se obtiene a través del semivariograma o la semivarianza.

El Kriging logra estimar el valor en un lugar de manera simple con una suma lineal o promedio ponderado los datos en su vecindad. Los valores son asignados a los datos muestreados dentro de la vecindad del punto a ser estimado de tal manera que minimice la varianza.

El Kriging ordinario (Point Kriging) es el método que se empleó en la realización de los mapas de este capítulo (zona urbana); en este caso se supone que la variable estacionaria, la media de la variable es constante pero desconocida. A la tercera etapa donde se utiliza el procedimiento de Kriging se le conoce como: **Predicción espacial**, donde las estimaciones de las variables estudiadas en los puntos no muestreados se realizan considerando una estructura de correlación espacial seleccionada, integrando la información obtenida indirectamente en forma de tendencias observadas (Moreno, 2009). Finalmente, mediante la interpolación se llevó a cabo la predicción en sitios de la región no muestreados por medio de la técnica Kriging, calculando un promedio ponderado de las observaciones muestrales.

Para evaluar la bondad del ajuste del modelo semivariograma elegido con respecto a los datos medidos con las predicciones hechas con el método Kriging, se usa la **validación cruzada** que consiste en excluir la observación de uno de los puntos muestreados (n) con los valores restantes ($n-1$) y el modelo de semivariograma seleccionado para predecir vía kriging el valor excluido.

3.1.3.1 *Correlación espacial*

Los mapas geoestadísticos se generaron con los programas GS+ versión 7.0 y ARCGis versión 10.2 (ESRI, 2010); los modelos se seleccionaron tomando en cuenta el mejor ajuste de los semivariogramas teóricos para visualizar la predicción espacial de las superficies georreferenciadas y la similitud que existe con los puntos de muestreo correspondientes a Polvo y Suelo urbano de acuerdo a los datos obtenidos de los parámetros χ y ARM.

3.1.3.2 *Regresión lineal*

El análisis de regresión lineal es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación entre variables. Este análisis fue empleado en muestras de polvo urbano y suelo superficial utilizando las variables de parámetros magnéticos (χ y ARM) con los resultados obtenidos de metales pesados. Se basa en el ajuste lineal de los datos calculando un coeficiente de correlación r^2 , el cual, numéricamente evalúa si las variables efectivamente están correlacionadas. El valor de r^2 toma entre los valores 0 y 1 resultado (0 cuando las variables son independientes y 1 cuando entre ellas existe relación perfecta).

3.2 Sedimentos costeros

3.2.1 Muestreo

La playa de Lázaro Cárdenas tiene una longitud de aproximadamente 75 km; a lo largo de ella se muestreó una línea de costa de 7 km, la cual consistió en un transecto longitudinal de Sur a Oeste, de donde fueron extraídos nueve núcleos de sedimentos costeros, en el periodo del 7 al 9 de marzo de 2014 en temporada de secas (Fig. 3-7). Los núcleos colectados más cercanos a la industria fueron: LC01 (Núcleo 1), LC03 (Núcleo 3), LC04 (Núcleo 4), LC05 (Núcleo 5) y LC06 (Núcleo 6) en intervalos de 200 m de separación entre uno y otro; el resto de los núcleos muestreados en la zona de uso recreativo y/o turístico se tomaron con una distancia

de 1 ~ 1.5 km aproximadamente: LC07 (Núcleo 7), LC09 (Núcleo 9), LC10 (Núcleo 10) y LC11 (Núcleo 11).

La extracción de núcleos se realizó de la siguiente manera (Fig. 3-6):

- Se identificó el sitio de muestreo a lo largo de la playa de Lázaro Cárdenas y a una distancia al mar de aproximadamente 25 metros, la selección se realizó contemplando un punto intermedio de humedad que es la principal condición de selección que consideran las tortugas marinas.
- Se introdujo el núcleo (tubo de PVC de 5 cm de diámetro) a presión hasta obtener la profundidad de un metro aproximadamente.
- Con una pala de plástico se excavó alrededor del núcleo para facilitar su extracción.
- Finalmente fue etiquetado y cerrado con bolsas de plástico y ligas elásticas por ambos lados (cima y base) del núcleo para evitar el movimiento del material dentro del núcleo.
- También en cada sitio de muestreo se complementó tomando notas, registro fotográfico y georeferenciación.

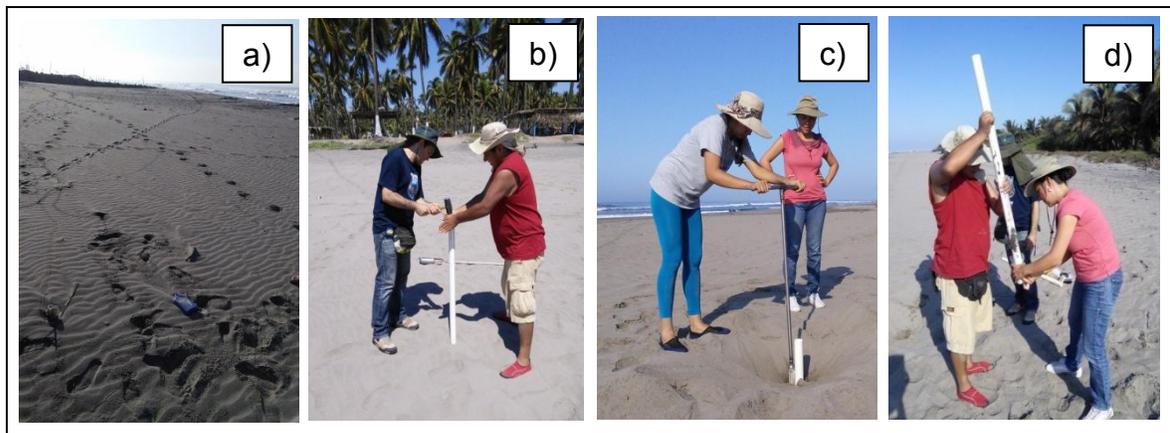


Fig. 3-6. Muestreo del núcleo: a) Selección del sitio, b) Introducción del núcleo a presión, c) Extracción del núcleo, d) Etiquetado y sellado del núcleo extraído por ambos lados.

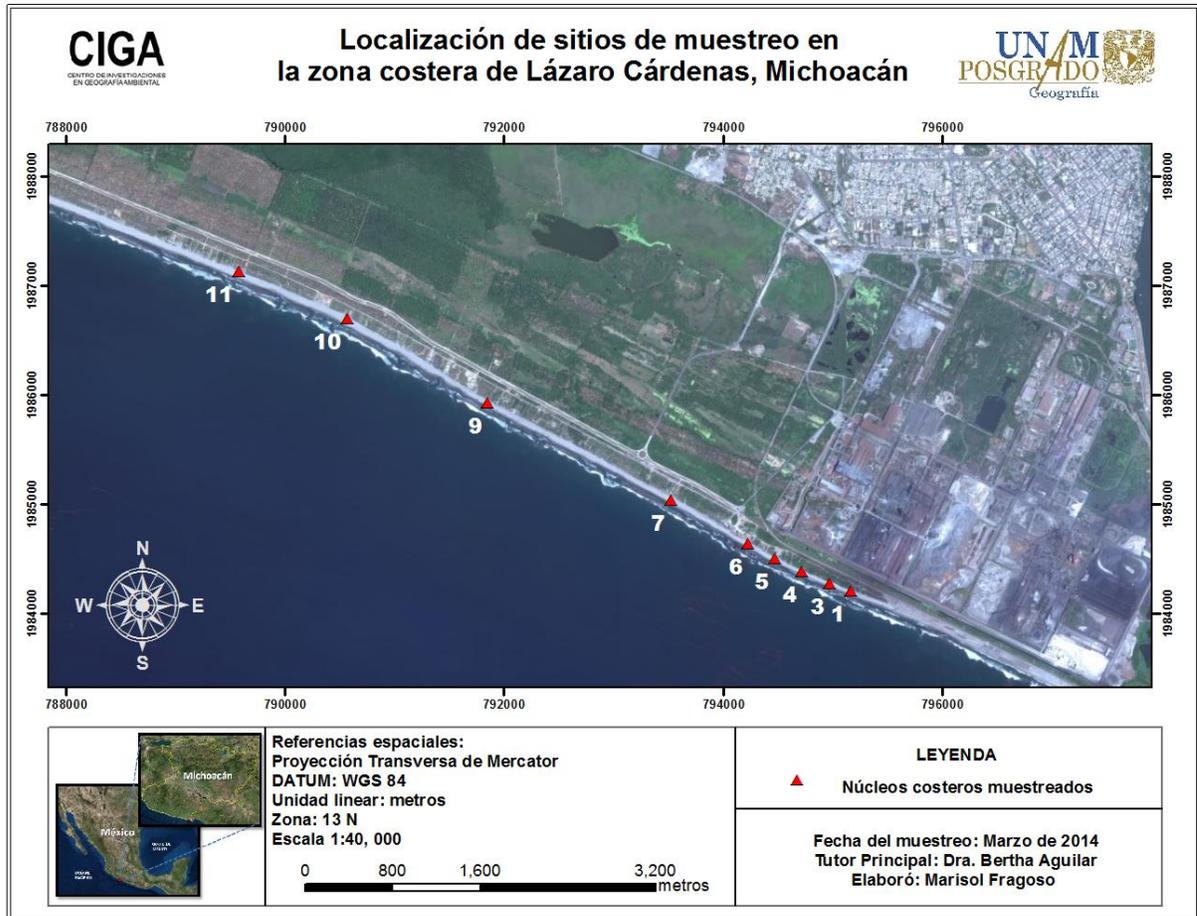


Fig. 3-7. Mapa Identificación de los núcleos extraídos de la playa de Lázaro Cárdenas. Cada número correspondiente al identificador etiquetado desde la colecta de los núcleos: **1**→ LC01, **3**→LC03, **4**→LC04, **5**→ LC05, **6**→LC06, **7**→LC07, **9**→LC09, **10**→LC10 y **11**→LC11 de costa de la playa de Lázaro Cárdenas, Michoacán

3.2.2 Submuestreo y preparación de muestras discretas

Para poder realizar los análisis correspondientes a los nueve núcleos se hizo un submuestreo que se describe a continuación (Fig. 3-8):

- Se cortó el núcleo de manera longitudinal para repartir simétricamente el material contenido en el núcleo. Se realizó el submuestreo, de acuerdo a la delimitación que se hizo bajo la observación de las capas que presentaba, y cuando se tenía una coloración homogénea se submuestreaba en un intervalo de 5 cm.

- Las submuestras con excedente de humedad se colocaron en cajas de petri y se secaron en el horno a una temperatura de 60 °C por 24 horas.
- Una vez secas, las submuestras se fijaron en cubos de plástico de 11 cm³, se pesaron en una balanza y se continuó con el análisis magnético y posteriormente el químico.

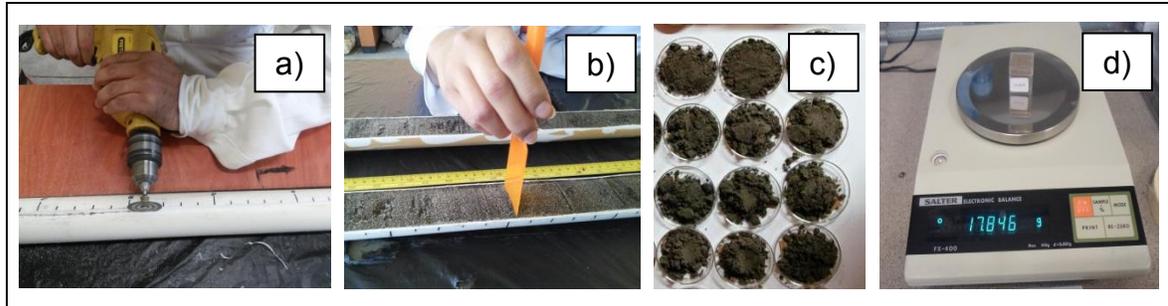


Fig. 3-8. Submuestreo y preparación del material: a) División del núcleo con taladro de disco eléctrico, b) Observación de capas y submuestreo de núcleo, c) Secado del material en cajas de petri y d) Medición de las muestras fijadas en cubos de plástico.

3.2.3 Laboratorio: Mediciones magnéticas y químicas

Se empleó el mismo equipo de laboratorio utilizado en las muestras de Polvo urbano y Suelo superficial, realizando las siguientes mediciones: Susceptibilidad magnética a alta y baja frecuencia (χ_{hf} , χ_{lf}), Magnetización Remanente Natural (NRM), Magnetización Remanente Anhistéretica (ARM), susceptibilidad magnética dependiente de la temperatura (κ -T) y Fluorescencia de Rayos X (FRX).

3.2.3.1 Susceptibilidad magnética mediciones continuas y discretas

Previo al submuestreo de muestras discretas en los núcleos, se midió la susceptibilidad magnética (κ_{lf}) en intervalos de 2 cm (mediciones continuas) de la base a la cima del núcleo. Para esto se utilizó el equipo: MS2 Bartington (magnetic susceptibility meter) el cual despliega el valor de la susceptibilidad, y el sensor usado fue el MS2C, especial para núcleos sedimentarios (Fig. 3-9 a).

Después se midieron los valores de susceptibilidad magnética a alta (κ_{hf}) y baja (κ_{lf}) frecuencia a 470 Hz, con el sensor dual MS2B en un equipo Bartington en las muestras discretas fijadas en los cubos de plástico (Fig. 3-9 b).

Los valores obtenidos de susceptibilidad se normalizaron para obtener la susceptibilidad magnética por unidad de masa a baja y alta frecuencia (χ_{hf} , χ_{lf}), de los cuales el valor de baja frecuencia se utilizó para seleccionar dos muestras de cada núcleo: una de valor más fuerte ó alto y otra de valor más débil o más bajo. Las muestras seleccionadas fueron sometidas a experimentos termomagnéticos (susceptibilidad magnética dependiente de la temperatura, k vs. T) y adquisiciones de ARM; también se seleccionaron muestras para la determinación y cuantificación de metales pesados a diferentes profundidades de cada núcleo.

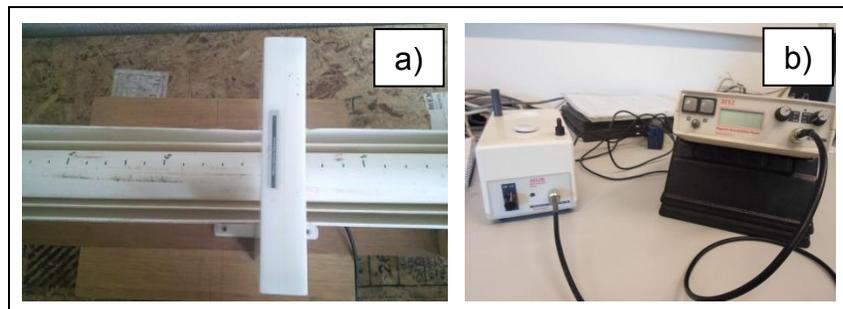


Fig. 3-9. a) Medición de susceptibilidad magnética previa al submuestreo de los núcleos usando el sensor MS2C y b) Medición de susceptibilidad magnética a dos frecuencias (κ_{hf} y κ_{lf}) después del submuestreo usando el sensor dual MS2B.

3.2.3.2 Curvas k - T y curvas de Adquisición de ARM

El criterio de selección de muestras para las curvas k - T fue considerar aquellas dos que tuvieran el valor más alto y el de valor más bajo de susceptibilidad para obtener las respectivas curvas mediante las que se logran identificar el tipo de mineral magnético. Del mismo modo, se seleccionaron las muestras en las que se realizaron experimentos de ARM, para observar el comportamiento en muestras con valores extremos y determinar los sitios más aptos para el desove de las tortugas marinas así como el sitio más afectado por la contaminación.

3.2.3.3 NRM, ARM y χ_{fd} %

Estos parámetros se midieron en todas las submuestras que se obtuvieron de los sedimentos costeros extraídos de la playa de Lázaro Cárdenas. Los resultados se muestran en las Figuras: Fig. 4-23 a Fig. 4-27.

3.2.3.4 Número de submuestras y análisis de laboratorio

En la Tabla 3-2 se desglosan las 194 submuestras obtenidas de los nueve núcleos, mostrando los diferentes parámetros magnéticos y químicos medidos. Para la selección de submuestras en las que se determinaría cada parámetro magnético se tomó en cuenta: la ubicación en la línea de costa y los tres principales usos de suelo identificados en la misma (industrial, turístico y área de conservación). La selección de muestras para el análisis de FRX se realizó seleccionando los valores más altos, medios y bajos de χ_{ff} que presentaban a diferentes profundidades los núcleos costeros.

Tabla 3-2. Número de submuestras de arena obtenidas de los núcleos y los diferentes parámetros medidos en el laboratorio

Análisis físicos y químicos	LC01 (85 cm)	LC03 (110 cm)	LC04 (108 cm)	LC05 (101 cm)	LC06 (116 cm)	LC07 (92 cm)	LC09 (108 cm)	LC010 (84 cm)	LC011 (118 cm)
χ_{hf} , χ_{ff}	19	24	25	20	24	19	22	17	24
NRM	19	24	25	20	24	19	22	17	24
ARM (sólocampo pico de 100 mT)	19	24	25	20	24	19	22	17	24
ARM (curvas completas: 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 y 100 mT)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
k-T	2	2	2	2	2	2	2	2	2
FRX	4	2	3	3	2	3	2	3	3

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 Polvo urbano y Suelo superficial

4.1.1 Susceptibilidad dependiente de la frecuencia (χ_{fd} %)

La Fig. 4-1 muestra la gráfica bivariada de la χ_{fd} % versus χ_{if} rediseñada por Dearing (1999), que ayuda a discriminar entre el tamaño de grano y dominio del estado magnético para clasificar las posibles fuentes emisoras de partículas magnéticas contaminantes magnetizadas. En la Fig. 4-1 (a), se muestran los valores de la χ_{fd} %, que van de 0 a 2.0% para casi todas las muestras de polvo urbano, indicando que la fracción magnética está dominada por granos multidominio (MD) y que se tiene una fracción mínima de granos superparamagnéticos (SP). En estudios previos, se han obtenido valores en este rango para polvo urbano, para diversas ciudades en el mundo (Aguilar et al., 2011; Blundell et al., 2009; Kapička et al., 2000; Lu and Bai, 2006; Xie et al., 2001; Yang et al., 2007). Valores en ese rango son muy comunes en muestras con alto contenido de partículas provenientes de procesos de combustión, como los que ocurren en la industria y los automotores, sobre todo en las muestras que presentan los valores más altos de χ_{if} .

En la Fig. 4-1 (b), se observan los valores obtenidos para las muestras de suelo en el rango de 0 a 4%, que significa una fracción muy pobre de granos SP, con predominancia de una mezcla de granos MD y granos de dominio pseudo simple (SSD); estos valores son poco comunes para suelo, que generalmente presentarían porcentajes entre 2 y 8 (Dearing, 1999), ya que en este tipo de muestras, la actividad biológica favorece la formación de granos SP; sin embargo, una causa muy probable de la disminución de los valores de este parámetro sea la acumulación de gran cantidad de partículas contaminantes de origen antrópico, sobre todo en las muestras de la zona industrial.

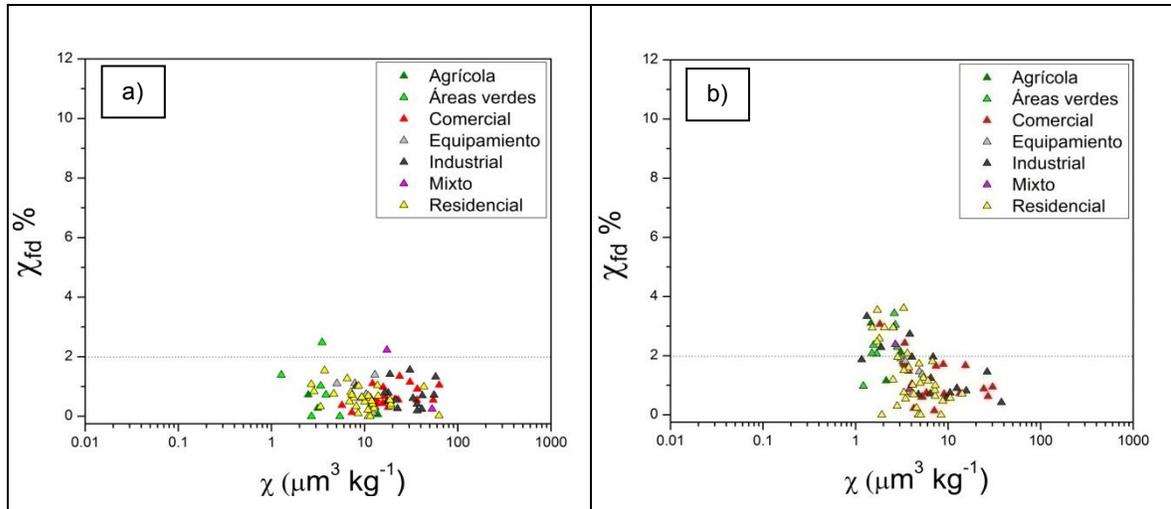


Fig. 4-1. Gráfica de dispersión de χ_{fd} % vs χ discriminando muestras por uso de suelo, para: a) Polvo; y, b) Suelo.

4.1.2 Curvas k-T

En la Tabla 4-1 se enlistan las muestras de polvo y suelo urbano que fueron seleccionadas para los análisis termomagnéticos. Los criterios seguidos para su selección son los siguientes: 1) distribución espacial y por tipo de uso de suelo, 2) valores extremos de susceptibilidad magnética de baja frecuencia, χ_{lf} . Estas muestras se sometieron a experimentos adicionales de adquisición de ARM.

Tabla 4-1. Muestras seleccionadas de polvo y suelo urbano pertenecientes a diferentes usos de suelo.

MUESTRA	USO DE SUELO	χ	MUESTRA	USO DE SUELO	χ
Polvo		($\mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	Suelo		($\mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)
LC04-P	Residencial	10.92	LC04-S	Residencial	14.17
LC08-P	Mixto	17.37	LC08-S	Mixto	2.69
LC18-P	Industrial	57.85	LC28-S	Comercial	30.17
LC28-P	Comercial	54.45	LC32-S©	Áreas verdes	1.56
LC39-P	Comercial	36.26	LC39-S	Comercial	24.24
LC76-P	Industrial	55.56	LC44-S	Industrial	37.59
LC105-P	Residencial	62.84	LC107-S	Industrial	15.68

En la Fig. 4-2 se presentan las curvas termomagnéticas obtenidas para las muestras seleccionadas. Por la forma y punto de decaimiento, se identifica la presencia de magnetita como el portador magnético, debido a que la T_c es de $\sim 580^\circ\text{C}$, aunque

probablemente también esté presente la maghemita, ya que en las cuatro curvas de calentamiento (línea roja) se observa un ligero aumento de susceptibilidad con el calentamiento hasta aproximadamente 260°C, lo que indica la creación de una fase magnética durante el calentamiento, probablemente a partir de minerales paramagnético. Las curvas k-T de la muestra 8 de polvo (LC08-P) indican que durante el enfriamiento ocurre un ligero enriquecimiento en minerales magnéticos, debido al aumento en los valores de la susceptibilidad magnética. Las muestras LC08-P y LC28-S muestran un comportamiento casi reversible, y las muestras LC08-S y LC28-P tienen un comportamiento irreversible lo que indica que durante la medición el material se transformó a otra fase mineral más estable, posiblemente magnetita.

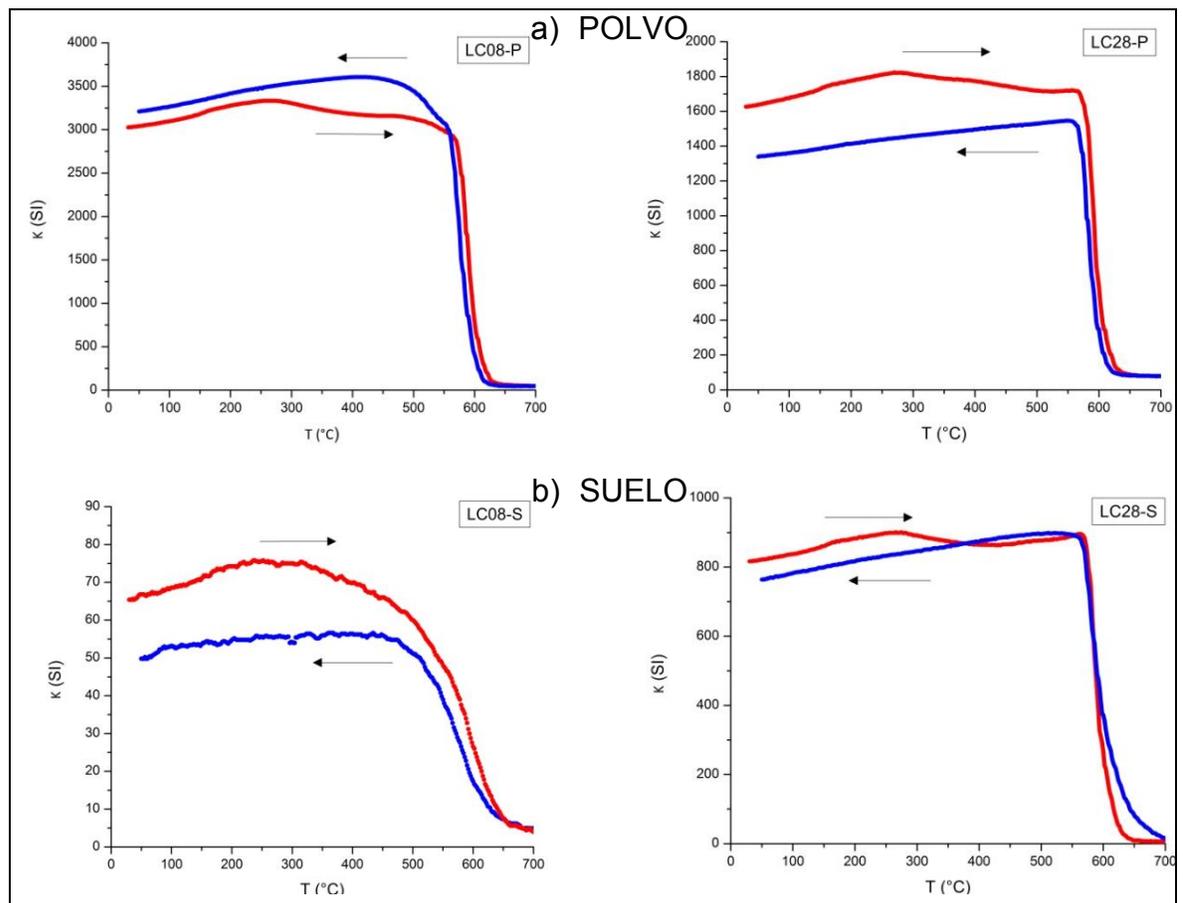


Fig. 4-2. Curvas k-T de muestras de Polvo urbano (LC08-P, LC28-P) y Suelo superficial (LC08-S, LC28-S).

4.1.3 Curvas ARM

En la Fig. 4-3 (a), se muestran las curvas de adquisición de ARM para polvo, en donde destaca que los valores máximos se obtuvieron para la zona mixta. Cabe señalar que, durante el muestreo fue notorio que la zona industrial presenta un mejor mantenimiento, lo que impide la acumulación de polvo resuspendido, mientras que en el resto de la ciudad se tiene una acumulación temporal mayor. Al no haber muestras control de polvo, las muestras del uso de suelo residencial presentan los valores mínimos.

Por otro lado, en la Fig. 4-3 (b), se muestran las curvas de adquisición de ARM para suelo, y se observan valores mucho mayores para la zona industrial mientras que los mínimos corresponden a las muestras control, como era de esperarse. Es notable que las muestras de zona residencial también desplieguen valores bajos en relación a los de la zona industrial. Esto podría hablarnos de una acumulación a largo plazo, de los contaminantes en esta última zona.

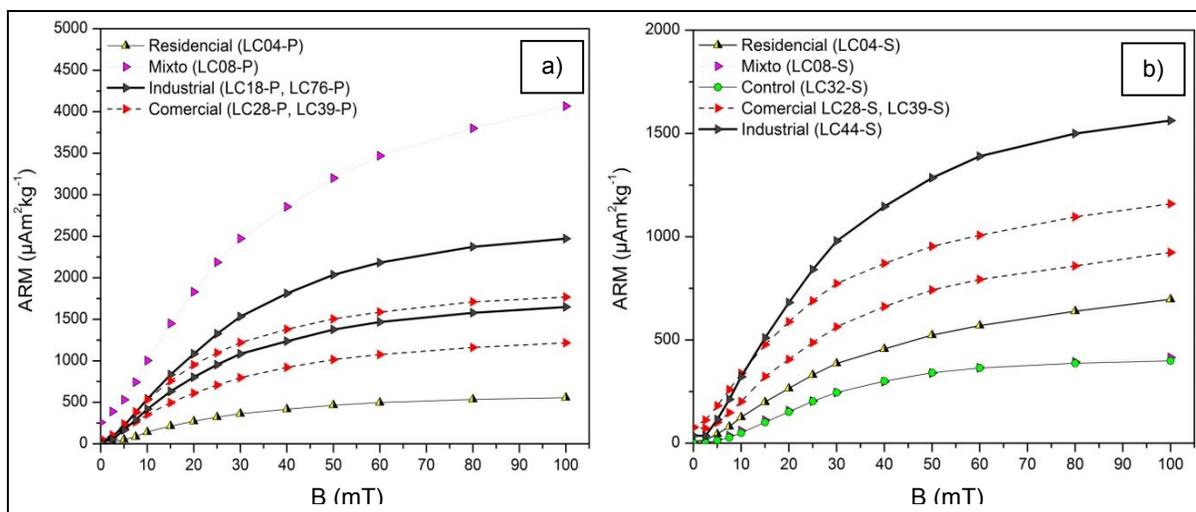


Fig. 4-3. Curvas de adquisición de ARM para muestras seleccionadas de acuerdo a los valores más altos de χ_{if} de algunos usos de suelo urbano en: a) Polvo y b) Suelo.

4.1.4 Cuantificación de metales pesados

La selección de los sitios para el análisis de FRX se realizó siguiendo los criterios indicados anteriormente. La Tabla 4-2 enlista las concentraciones en ppm (mgkg^{-1})

de los metales pesados presentes en las muestras seleccionadas de polvo, y en la Tabla 4-3 los metales pesados presentes en las muestras de suelo. Se subrayan con color amarillo los valores para algunos elementos como el V, Cu, Ni, Pb, Zn y Cr, que sobrepasan los rangos permisibles, de acuerdo a las Normas Oficiales de México (NOM 147 y 021), Estados Unidos (EPA, 2007) y la Unión Europea (European Commission, 2003).

Tabla 4-2. Concentración de metales pesados en muestras de polvo urbano, determinadas mediante FRX (mg kg^{-1} material seco).

MUESTRA	USO DE SUELO URBANO	Sr	Zr	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
LC04-P	Residencial	294	168	147	76	30	32	63	273	55
LC08-P	Mixto	152	61	748	293	91	13	127	139	14
LC13-P	Comercial	182	92	306	128	70	21	127	154	27
LC15-P	Mixto	162	85	278	123	60	21	111	109	23
LC16-P	Comercial	285	144	183	104	29	33	37	92	29
LC23-P	Residencial	239	183	113	63	29	21	34	92	23
LC28-P	Comercial	188	109	159	106	59	28	88	131	52
LC32-P	Agrícola	213	134	87	38	14	19	26	74	13
LC39-P	Comercial	214	145	142	93	46	27	85	157	41
LC53-P	Agrícola	264	179	171	80	27	22	50	76	23
LC57-P	Equipamiento	261	230	112	46	21	20	37	74	26
LC68-P	Comercial	198	174	516	153	36	30	51	113	28
LC72-P	Residencial	291	152	96	52	15	25	31	131	28
LC76-P	Industrial	190	116	355	245	61	56	75	436	319
LC105-P	Residencial	173	156	230	240	83	41	120	174	73
LC107-P	Industrial	209	136	579	254	26	18	37	111	24
LC109-P	Industrial	222	271	540	295	52	69	58	191	52

La contaminación que presenta el suelo tiene un porcentaje más bajo de dispersión a diferencia de los resultados obtenidos para las muestras de polvo. Las altas concentraciones de V, Zn, Cu que presentan las muestras tanto de polvo como de suelo, pueden ser atribuidas al excesivo uso de fertilizantes y plaguicidas, ya que incluso las muestras control presentan altos niveles de estos. Los altos niveles de Pb se concentran en el tipo de uso de suelo industrial.

Tabla 4-3. Concentración de metales pesados en muestras de suelo superficial, determinadas mediante FRX (mg kg⁻¹ material seco).

MUESTRA	USO DE SUELO URBANO	Sr	Zr	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
LC04-S	Residencial	206	141	159	73	40	35	124	212	48
LC08-S	Mixto	301	218	127	87	19	37	33	96	26
LC13-S	Comercial	291	145	235	106	32	32	66	217	43
LC15-S	Mixto	292	189	138	75	20	29	49	114	20
LC16-S	Comercial	323	128	143	82	23	30	50	149	65
LC23-S	Residencial	245	163	114	56	21	24	38	114	34
LC28-S	Comercial	228	122	143	112	45	33	110	222	131
LC32-S	Agrícola	254	150	149	70	26	35	58	131	20
LC32-S -C	Áreas Verdes	248	158	152	69	27	36	61	132	20
LC39-S	Comercial	239	138	149	93	42	29	96	189	82
LC53-S	Agrícola	314	118	111	55	22	22	37	121	41
LC57-S	Equipamiento	359	238	132	100	22	37	27	86	16
LC68-S	Comercial	244	138	143	68	25	21	41	92	33
LC72-S	Residencial	341	172	108	71	19	32	39	109	21
LC76-S	Industrial	300	203	159	87	22	34	42	142	44
LC105-S	Residencial	144	156	116	56	32	29	52	149	32
LC107-S	Industrial	240	154	184	81	26	28	94	351	45
LC109-S	Industrial	233	229	114	73	21	29	17	73	15

4.1.4.1 Concentraciones de metales pesados en los diferentes usos de suelo urbano

En la Fig. 4-4 se muestran las concentraciones de algunos metales pesados en muestras de polvo urbano agrupando por tipo de uso de suelo. Predominan las elevadas concentraciones de Zr, Zn, Cr, Pb y Ni para el uso de suelo Industrial, lo cual indica que este tipo de actividades cercanas a la ciudad pueden convertirse en un grave problema para la salud humana (Zhou et al., 2014). El segundo lugar lo ocupa el uso de suelo mixto con las concentraciones más elevadas de V, y en tercer lugar el uso de suelo residencial.

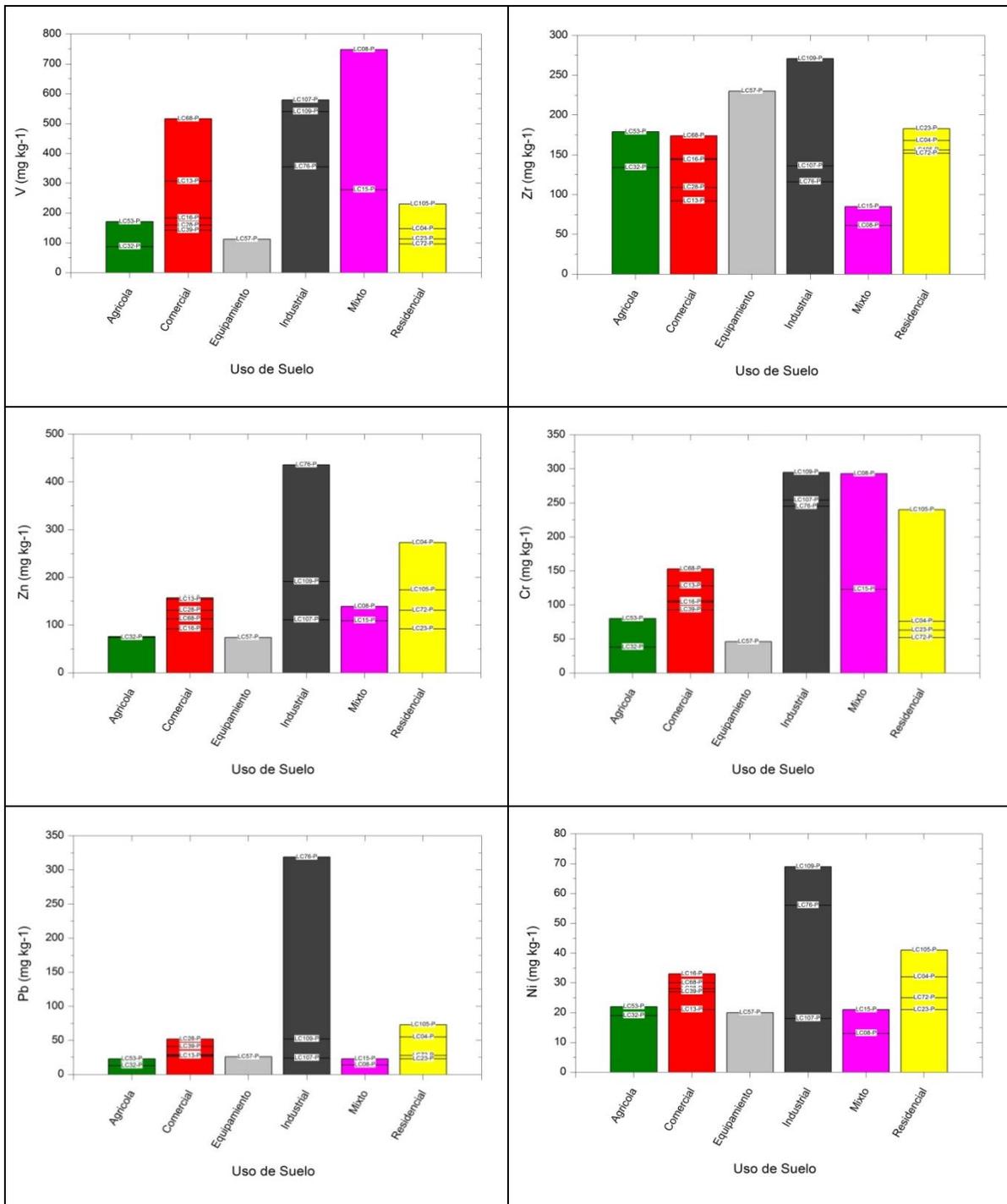


Fig. 4-4. Concentraciones V, Zr, Zn, Cr, Pb y Ni (mg kg⁻¹) analizados en muestras de polvo.

En la Fig. 4-5 se muestran los resultados de concentración de metales pesados obtenidos para muestras de suelo; las concentraciones más altas corresponden a: V, Cr y Pb para el uso de suelo comercial, seguido del uso de suelo industrial con altas

concentraciones de Zr, Zn y Ni. Cabe recordar que estos elementos se acumulan a lo largo de años.

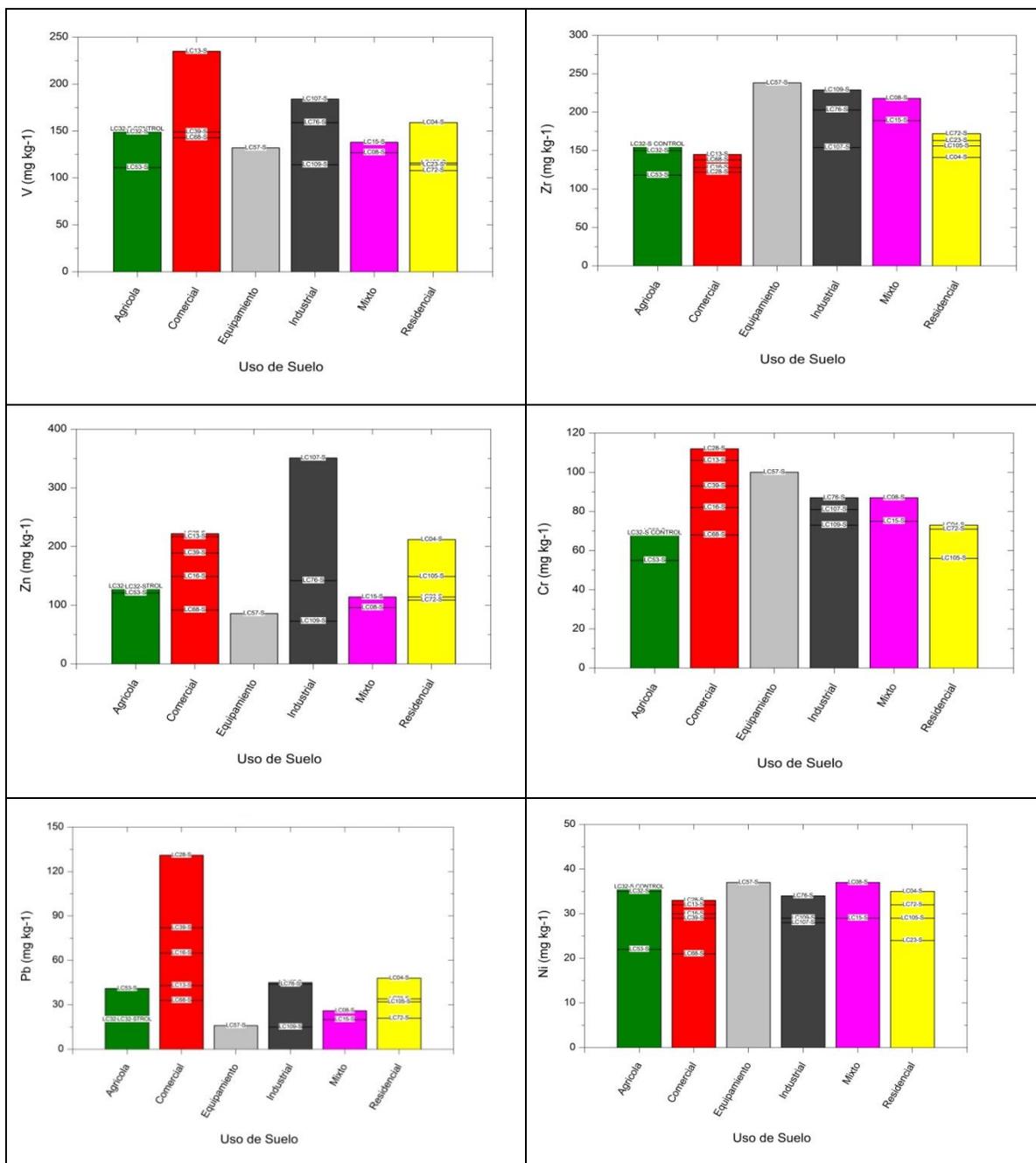


Fig. 4-5. Concentraciones V, Zr, Zn, Cr, Pb y Ni (mg kg⁻¹) analizados en muestras de suelo.

En el caso del Pb, cabe señalar que las elevadas concentraciones de este elemento puede llegar a causar graves daños a la salud en general, por lo que es importante tratar de mantener los límites de la NOM (SEMARNAP, 2000).

4.1.5 Correlaciones entre parámetros magnéticos y metales pesados

El análisis y el coeficiente de correlación reveló que los metales Cu, Co, Cr, Fe y V se encuentran fuertemente correlacionados con los parámetros de χ_{lf} y ARM en las muestras de polvo analizadas; en la Fig. 4-6 se muestran las correlaciones de χ_{lf} con Cu, Co, Fe y Cr, y en la Fig. 4-7 presenta las gráficas de correlación de ARM con Cr, V, Fe, Co y Cu.

Es importante mencionar que es de esperarse una buena correlación entre los parámetros magnéticos y el Fe, ya que a mayor concentración de este elemento, se supone un mayor contenido de minerales magnéticos y, por tanto, valores más elevados de dichos parámetros. Con el resto de los elementos analizados las correlaciones obtenidas son debidas únicamente a la asociación los mismos con los minerales magnéticos. Así, tenemos excelente correlación de los tres parámetros magnéticos medidos con el Cu y Co, mientras que con el Cr y V, la correlación presenta un r^2 muy bajo.

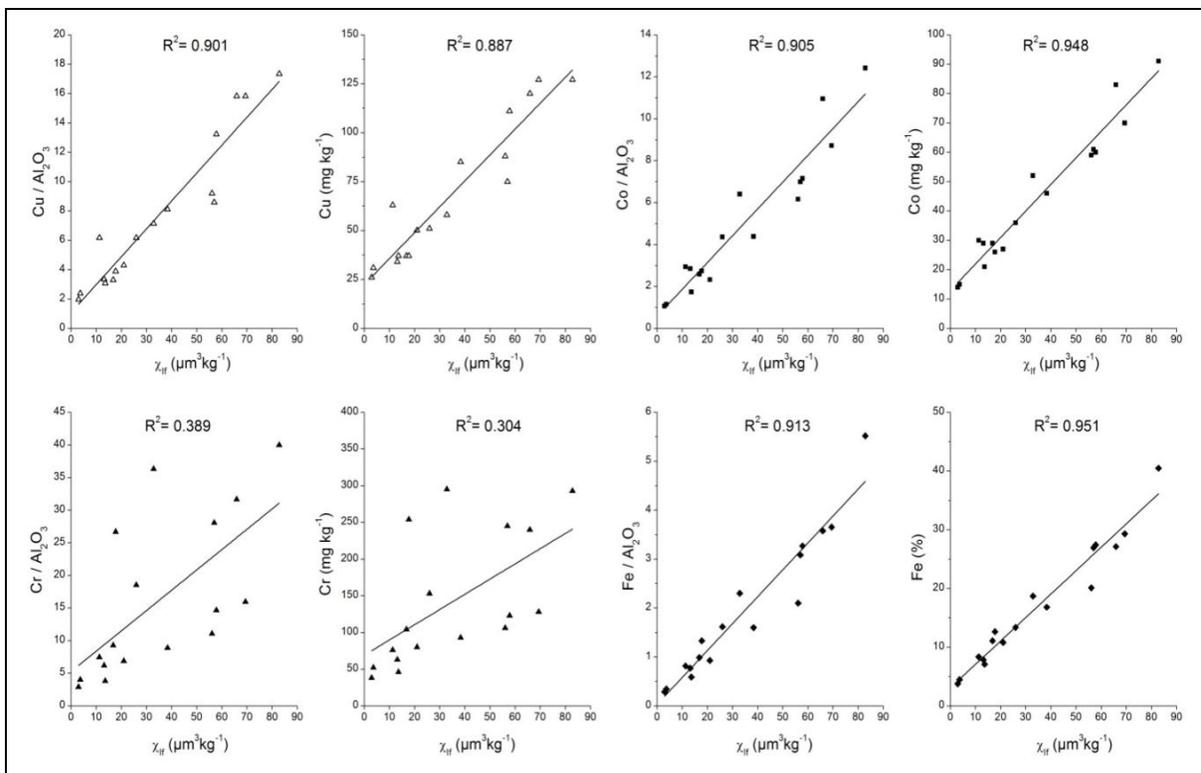


Fig. 4-6. Correlaciones obtenidas de χ_{lf} con Cr, Cu, Co y Fe en polvo de Lázaro Cárdenas.

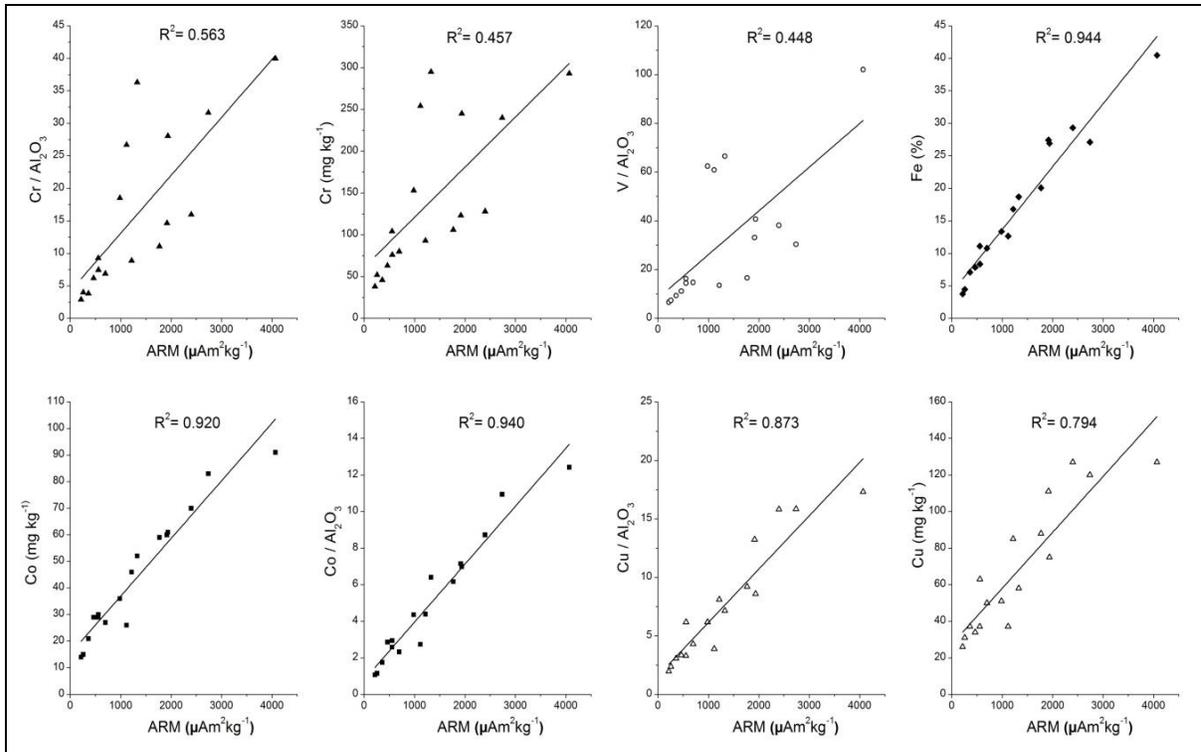


Fig. 4-7. Correlaciones obtenidas de ARM con Cr, V, Fe, Co y Cu en polvo de Lázaro Cárdenas.

En lo que respecta las muestras de suelo se obtuvieron excelentes correlaciones de los parámetros magnéticos con el Fe, Co y Cu; con el Pb, Zn y Cr se obtuvieron valores más bajos para r^2 , pero la correlación se considera buena, mientras que para el V y Ni la correlación fue menor. En las gráficas se pueden observar en la Fig. 4-8 para la χ_{if} con Fe, Cr, Co, Cu, Pb, V, Zn y Ni, y en la Fig. 4-9 ARM con Zn, Co, Fe, V, Cu, Cr y Pb. Se correlaciona mejor el suelo con la χ_{if} y el polvo con la ARM; sin embargo, los resultados obtenidos para las muestras de polvo nos permiten hacer una evaluación confiable usando los parámetros magnéticos como indicadores de contaminación por metales pesados, antes de realizar análisis químicos.

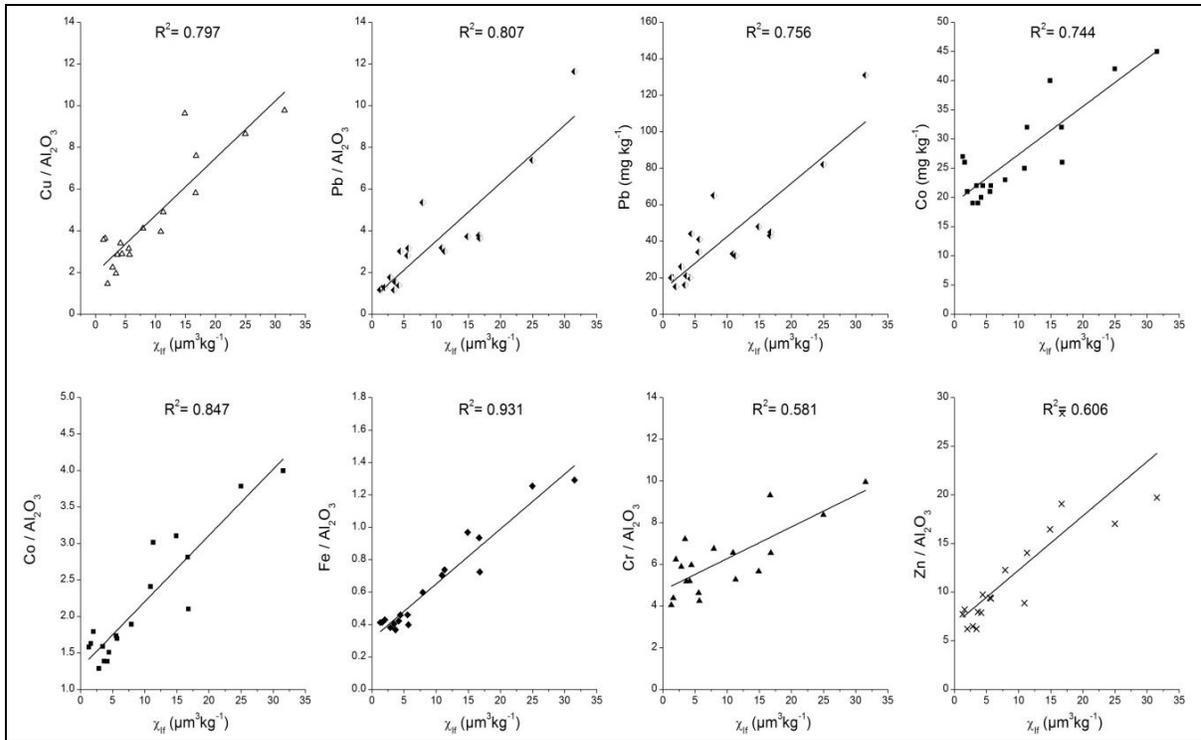


Fig. 4-8. Correlaciones obtenidas de χ_{If} con Fe, Cr, Co, Cu, Pb, V, Zn y Ni en suelo de Lázaro Cárdenas.

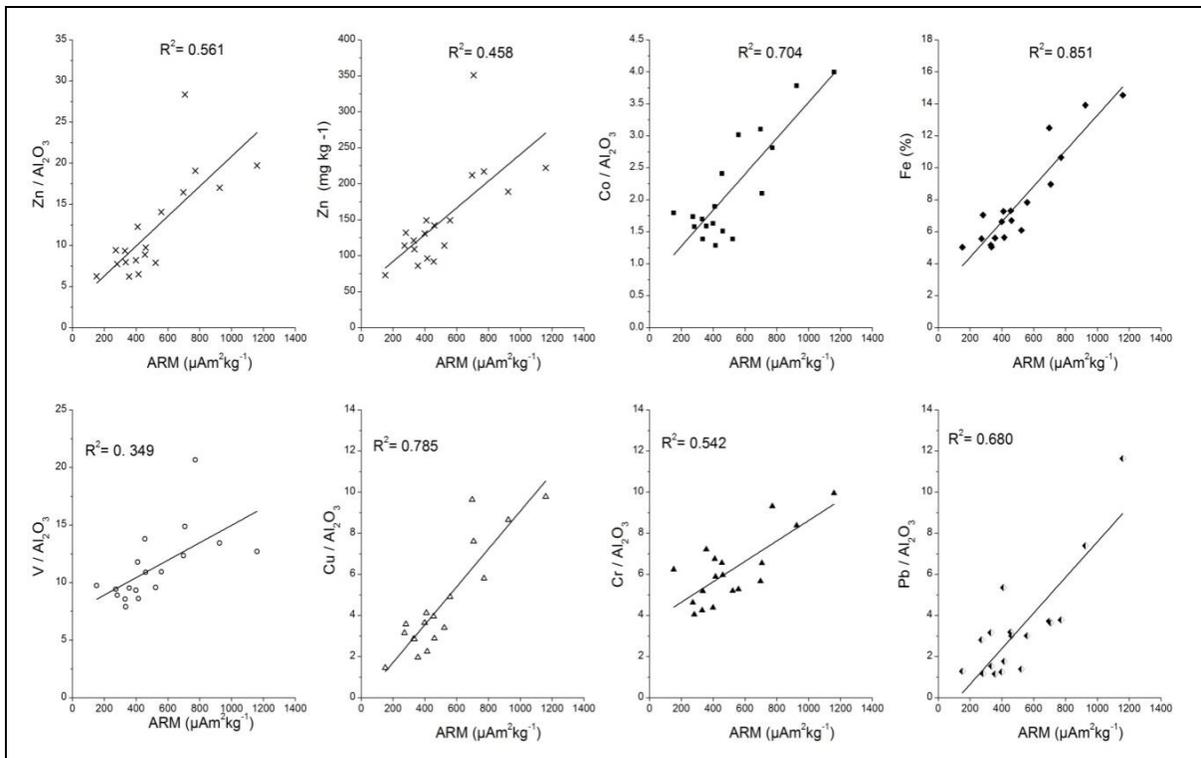


Fig. 4-9. Correlaciones obtenidas de ARM con Zn, Co, Fe, V, Cu, Cr y Pb en suelo de Lázaro Cárdenas.

En las figuras anteriores, los valores de la concentración de metales pesados se muestran en ppm (mg kg^{-1}) y/o normalizados sobre los porcentajes de Al_2O_3 ; esto se hace con la finalidad de eliminar el efecto de la dilución magnética (debido a una gran cantidad de minerales diamagnéticos) y poder realizar una correlación más confiable con los parámetros magnéticos de medidos.

4.1.6 Distribución espacial de χ_{lf} y ARM en la zona urbana de Lázaro Cárdenas, Michoacán

De acuerdo con la Tabla 4-4 se puede afirmar que las variables de χ y ARM cumplen con la hipótesis de autocorrelación espacial dado que el ajuste de los modelos teóricos de sus semivariogramas experimentales presentan un r^2 de más del 0.8, lo cual confirma que los métodos geoestadísticos son una herramienta de gran utilidad en la modelación e interpretación de los fenómenos observados en este tipo de estudios.

Tabla 4-4. Modelos teóricos ajustados a semivariogramas experimentales de variables de propiedades magnéticas medidas en muestras de polvo y suelo urbano.

Variable	Transformación de datos	Modelo	Proporción	Rango (km)	r^2
χ (polvo)	Logarítmica (desplazamiento= 0)	Exponencial	0.757	3.72	0.904
ARM (polvo)	Logarítmica (desplazamiento= -79)	Exponencial	0.766	5.55	0.900
χ (suelo)	Logarítmica (desplazamiento= -1)	Exponencial	0.796	3.23	0.880
ARM (suelo)	Logarítmica (desplazamiento= -60)	Exponencial	0.794	4.11	0.825

4.1.6.1 Semivariogramas

Los modelos teóricos de mejor ajuste de los semivariogramas experimentales fueron exponenciales; se optó por aplicar éste, debido a que la dependencia espacial tuvo un crecimiento exponencial respecto a la distancia y las observaciones.

En la Fig. 4-10 se muestran los modelos teóricos de los semivariogramas isotrópicos encontrados para a) χ -Polvo, a₁) ARM -Polvo; y b) χ -Suelo, b₁) ARM -Suelo. Para cada variable de polvo urbano se tuvieron 85 observaciones tomadas del muestreo sistemático de las cuadrículas de 500 m² aproximadamente y 89 observaciones para las variables de suelo.

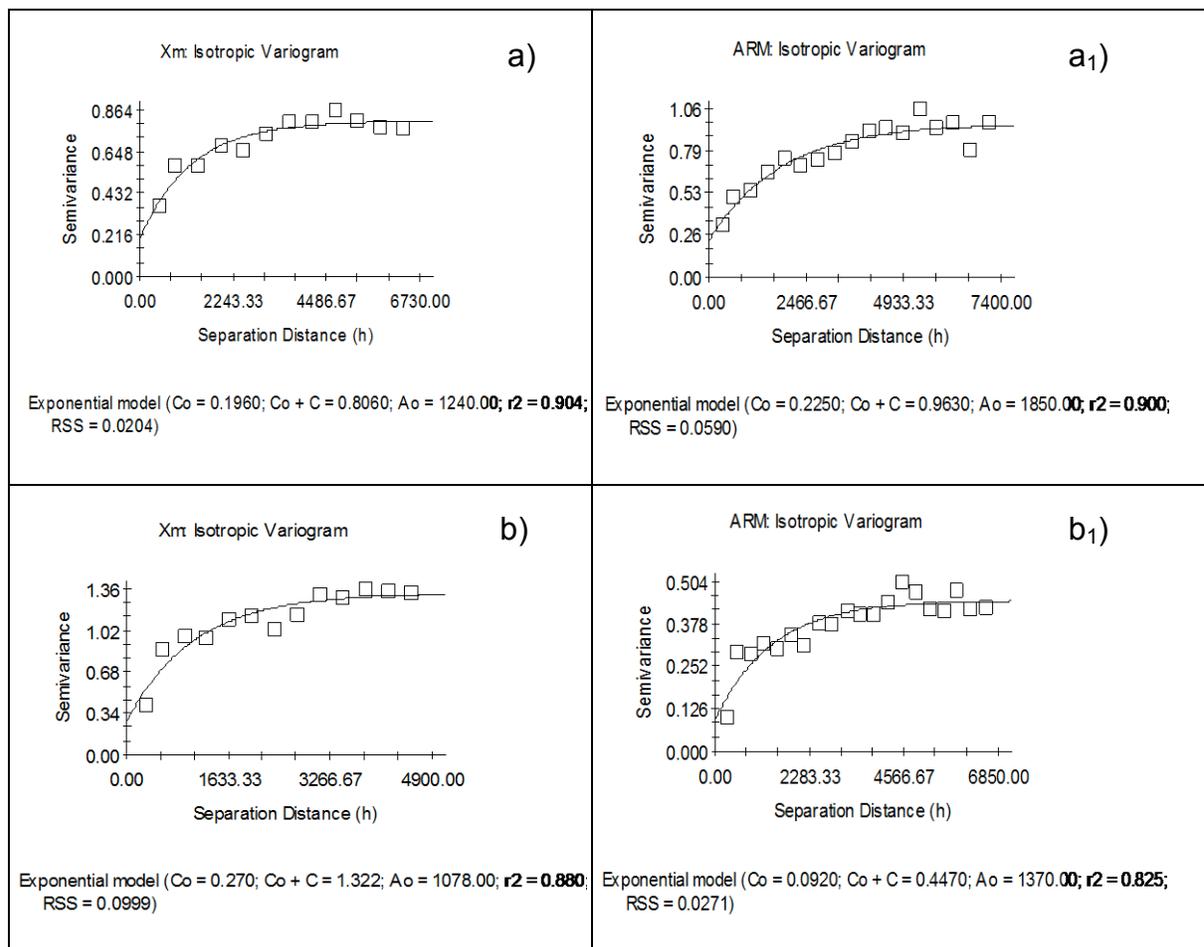


Fig. 4-10. Semivariogramas experimentales encontrados en a) Polvo y b) Suelo, con las variables de χ y ARM. La (h) es la distancia de separación entre puntos muestrales, el Co es el nugget ó semivarianza al azar, el Co + C es el Sill ó semivarianza estructural, Ao es el parámetro para calcular

el rango del modelo, el r^2 es el coeficiente de determinación del modelo y el RSS es la suma residual de cuadrados.

4.1.6.2 *Polvo urbano*

La interpolación resultado de los análisis geoestadísticos dio lugar a los mapas de polvo que se muestran en las Fig. 4-11 y Fig. 4-12; el mapa de la distribución espacial de la χ en polvo urbano, indica que en su superficie existe una relación y/o similitud con las muestras de polvo que se encuentran a una distancia dentro del rango 3.72 km de distancia; el coeficiente de correlación espacial de este modelo presentó un $r^2=0.904$ (Fig. 4-11). En este mapa se presentan los valores de χ más altos para la zona industrial (color rojo) y los valores más bajos en la parte norte de la ciudad en las áreas de uso agrícola principalmente (color azul marino).

La Fig. 4-12 que muestra el mapa de la distribución espacial de ARM de polvo presenta una similitud con los puntos muestreados en un rango no mayor a 5.55 km de distancia; el coeficiente de correlación dio un $r^2=0.900$. Claramente se observan dos manchas color rojo, la más grande abarcando en el uso de suelo industrial y la otra de menor tamaño en la avenida principal de la ciudad de Lázaro Cárdenas, con influencia probable de flujo vehicular, y los valores más bajos en la parte norte de la ciudad coincidiendo con el mapa de χ_{if} .

4.1.6.3 *Suelo urbano superficial*

Los mapas de suelo de χ (Fig. 4-13) y ARM (Fig. 4-14) presentaron una correlación de $r^2=0.880$ y $r^2=0.825$ en las interpolaciones de los parámetros magnéticos analizados. Los modelos experimentales presentaron una relación superficial con los puntos muestreados dentro del rango de 3.23 km en χ y 4.11 km en ARM. Estos mapas presentan los valores más elevados en la zonas de uso industrial y residencial, también se puede apreciar un poco la incidencia probablemente por el río Balsas con colores amarillos y turquesas como posible aporte de contaminantes al suelo en la parte Este de la ciudad.

Los resultados de suelo superficial brindan información de acumulación de contaminantes durante temporadas más prolongadas que las de polvo (éstos con acumulación a corto plazo), lo cual podría revelar que las manchas urbanas resultado de muestras de suelo, se debe principalmente al flujo vehicular en las avenidas principales (que se acumula a largo plazo) y las muestras de polvo debido a la industria. En el caso del polvo urbano, con la influencia adicional del viento, que los dispersa en el resto de la ciudad y la costa. Por otro lado las lluvias y el aseo doméstico ayudan a controlar y/o limpiar los contaminantes contenidos en los polvos urbanos por lo que no es tan evidente su influencia en los mapas de suelo.

Distribución Espacial de la Susceptibilidad Magnética de Polvos en la Zona Urbana de Lázaro Cárdenas, Michoacán

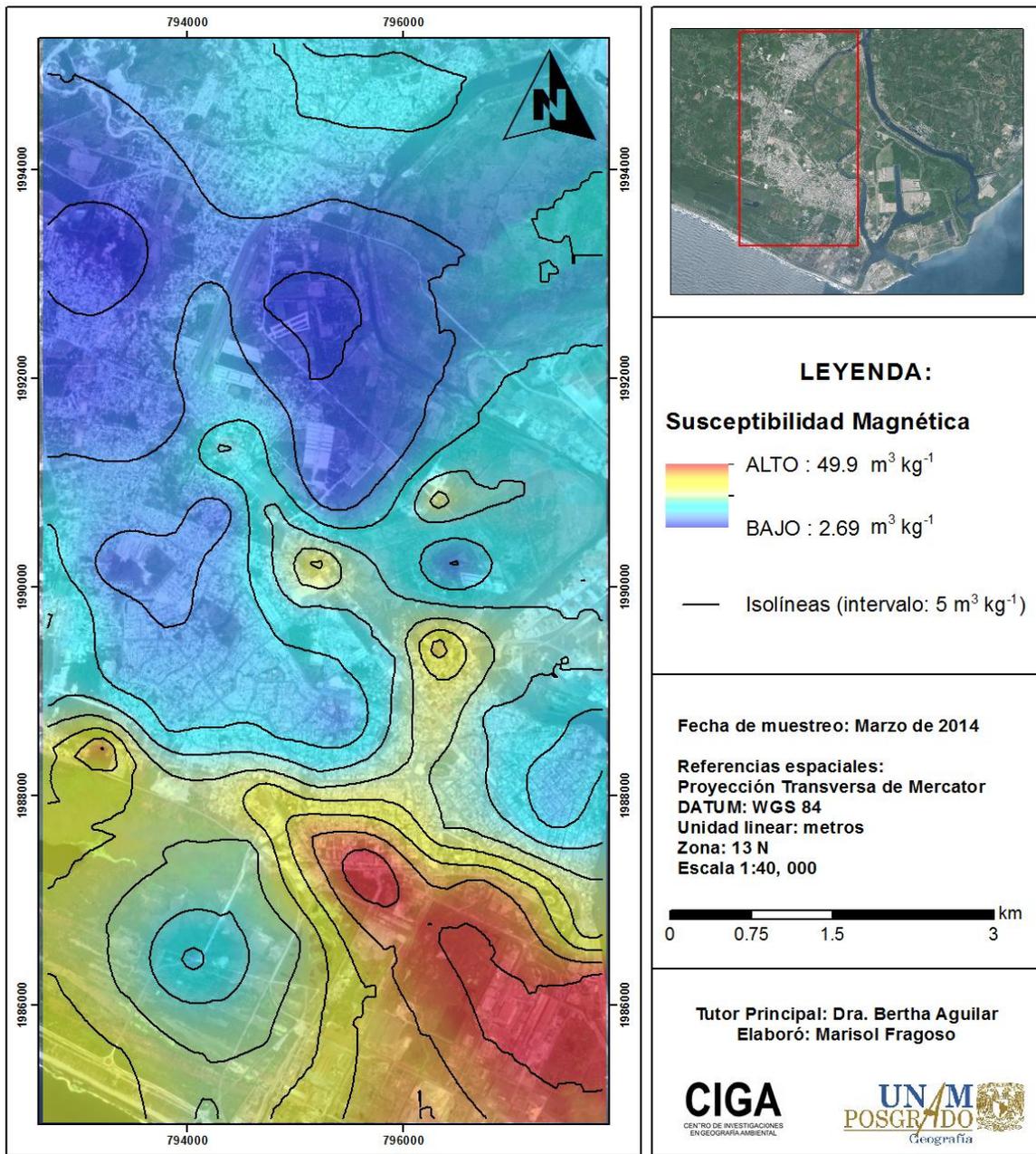


Fig. 4-11. Mapa geostatístico que representa los valores de χ de polvo. El variograma Isotrópico muestra un $r^2 = 0.904$.

Distribución Espacial de la Magnetización Remanente Anhistórica (ARM) de Polvos en la Zona Urbana de Lázaro Cárdenas, Michoacán

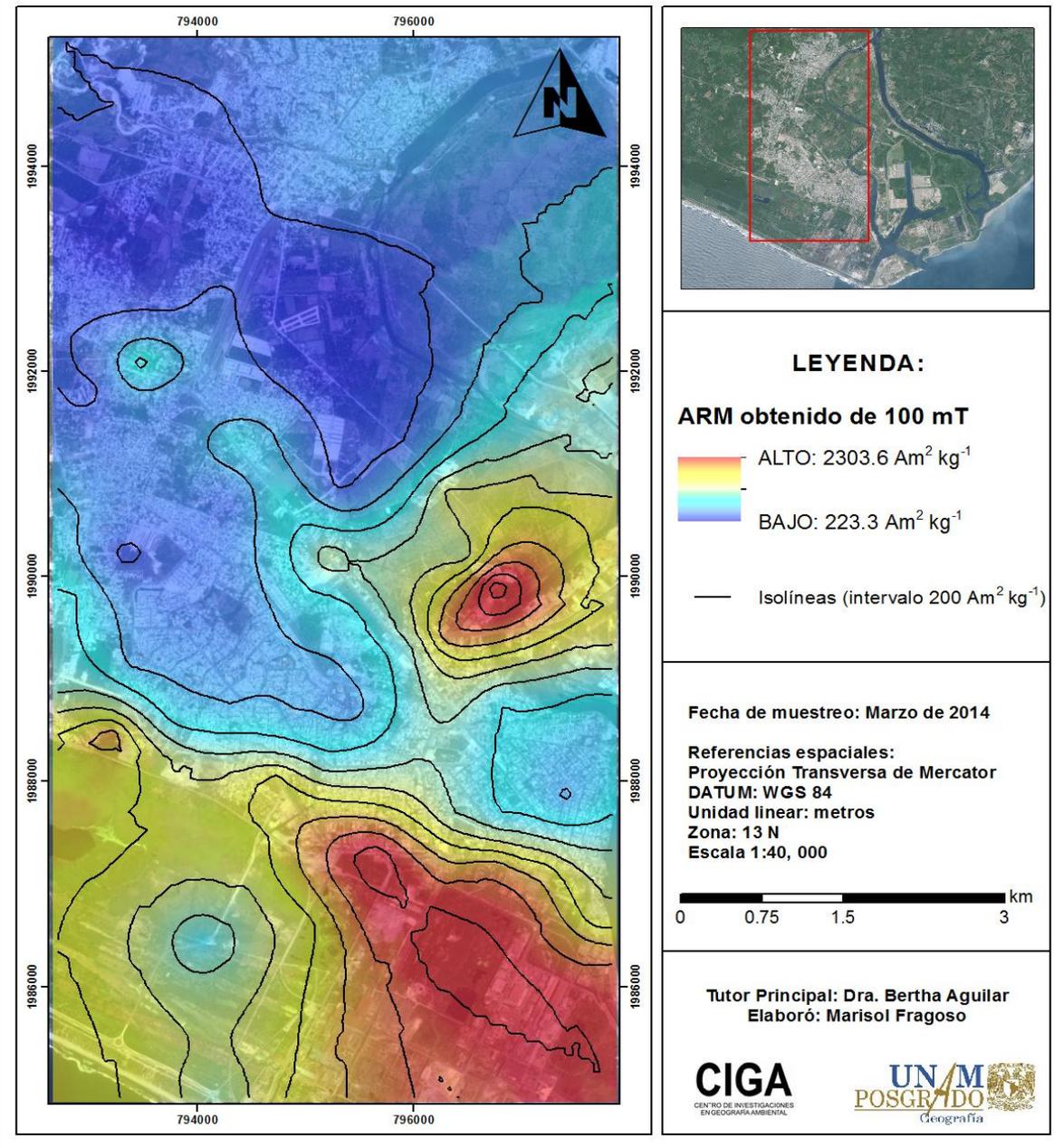


Fig. 4-12. Mapa geoestadístico que representa los valores de ARM de polvo. El variograma Isotrópico muestra un $r^2 = 0.900$.

Distribución Espacial de la Susceptibilidad Magnética de Suelos en la Zona Urbana de Lázaro Cárdenas, Michoacán

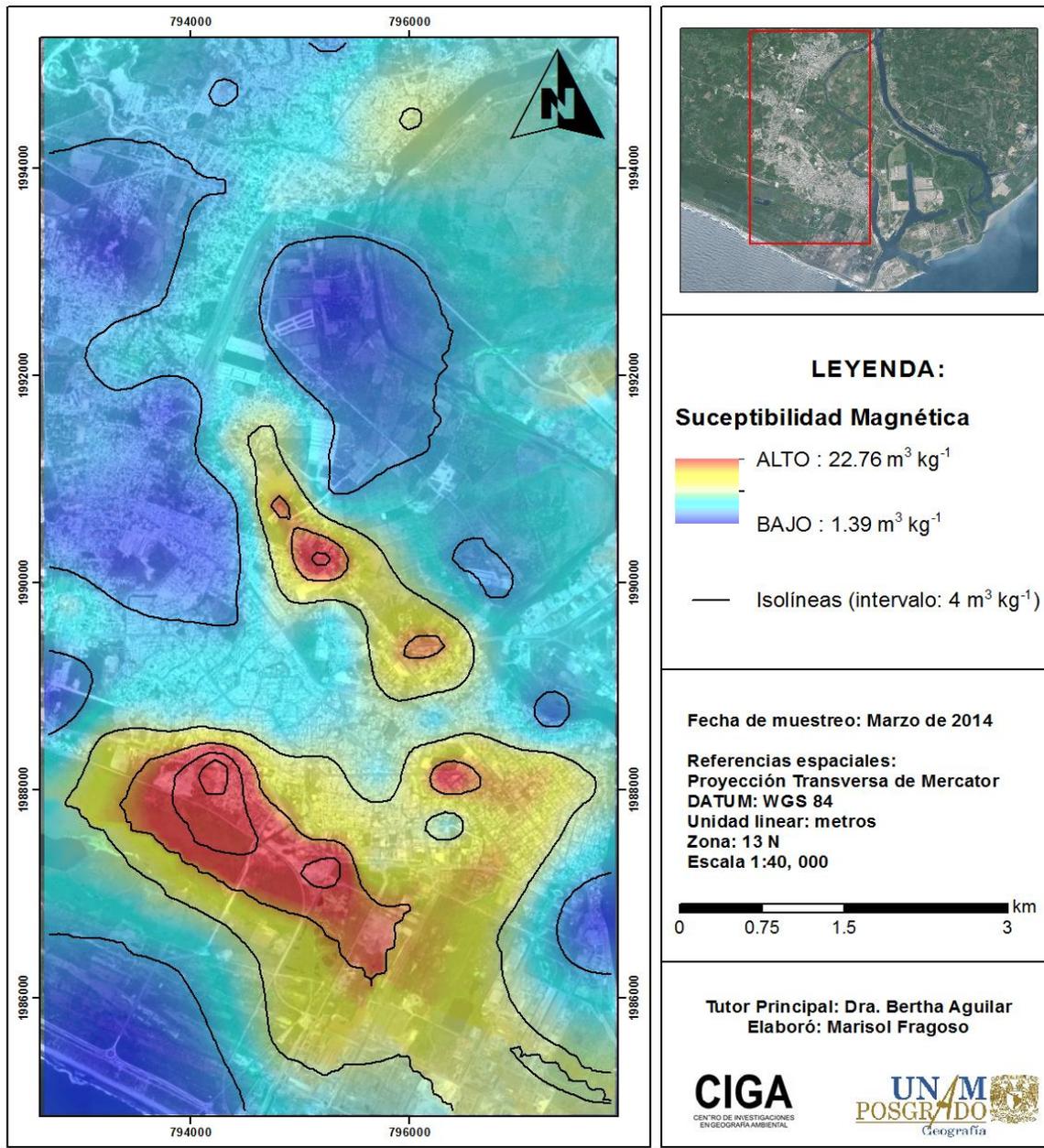


Fig. 4-13. Mapa geoestadístico que representa los valores de χ de suelo. El variograma Isotrópico muestra un $r^2 = 0.880$.

Distribución Espacial de la Magnetización Remanente Anhistérica (ARM) de Suelos en la Zona Urbana de Lázaro Cárdenas, Michoacán

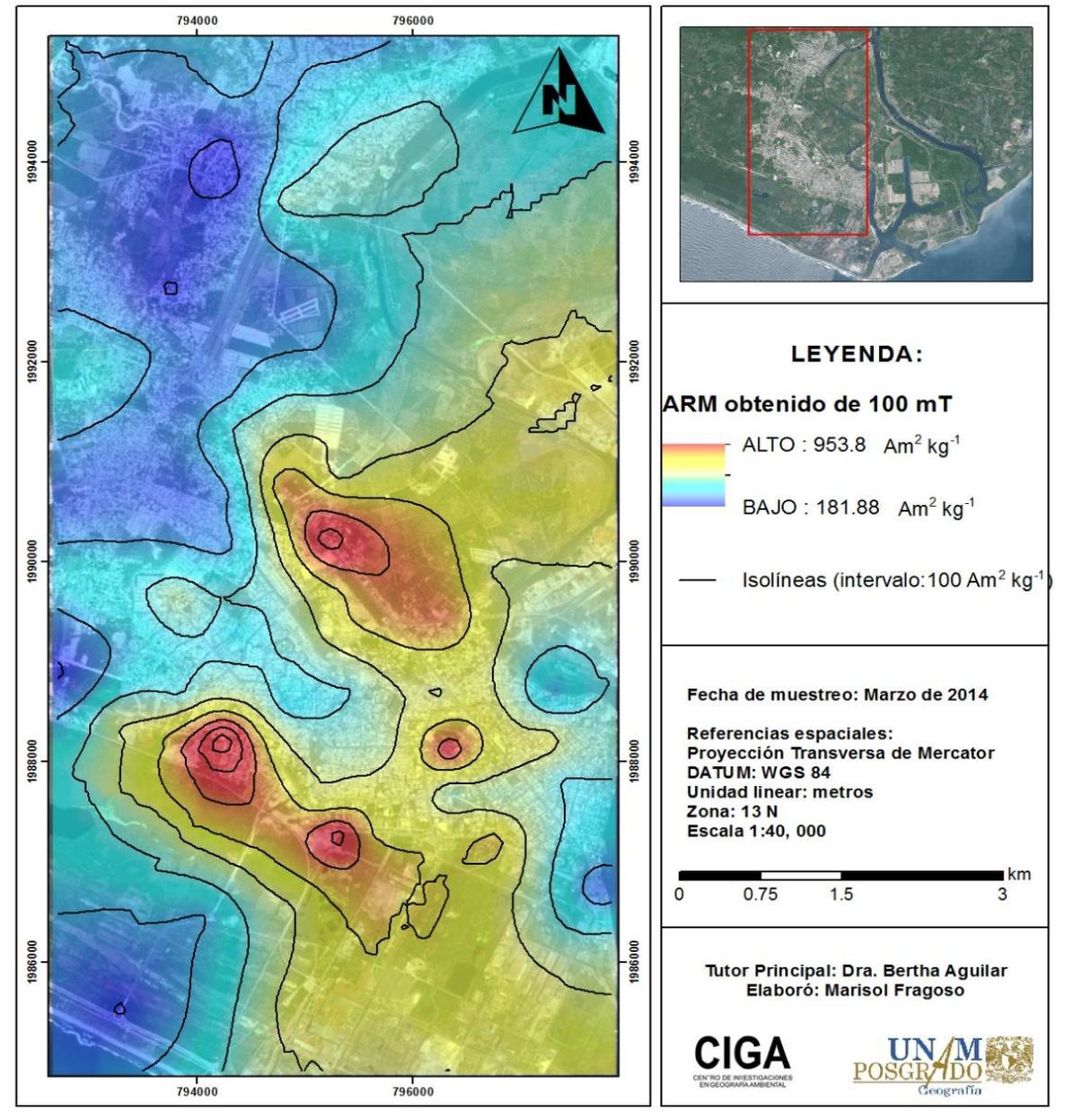


Fig. 4-14. Mapa geostatístico que representa los valores de ARM de suelo. El variograma Isotrópico muestra un $r^2 = 0.825$.

En general los mapas generados a partir de las interpolaciones en polvo urbano y suelo superficial, muestran una dependencia espacial con un coeficiente de correlación muy elevado; al asociar estas interpolaciones con las correlaciones de los

parámetros χ_{if} y ARM Vs metales pesados se podría considerar que las concentraciones de algunos elementos contaminantes indican el patrón de dependencia espacial de acuerdo a los rangos de distribución espacial de χ y ARM.

4.2 Sedimentos costeros

Tabla 4-5. Descripción general del núcleo 1 y 3

Núcleo 1	
 <p style="text-align: center;">CIMA</p> <p style="text-align: center;">BASE</p>	<p>Fecha: 07/03/14</p> <p>Coordenadas X: 795174, Y: 1984210. Altura: 0 msnm. Geoforma: Planicie. Microrelieve: Plano. Pendiente 0.5-1.0 %. Condiciones meteorológicas: Día soleado despejado y sin lluvia en el último mes. Vegetación nativa: Arbustos deciduos, perennes y cultivos (en descripción de flora). Uso del suelo: industrial. Material parental: Roca sedimentaria. Distancia al mar: 25 m. Orientación: S.O.</p> <p>Presencia de humedad, textura arenosa, estructura granular, sin presencia de raíces y diferenciación de capas a lo largo del núcleo.</p> <p>Profundidad: 85 cm</p> <p>Submuestras: 19</p> <p>Observaciones: Se encontraron fragmentos de rocas a 64 cm de profundidad en la submuestra número 16.</p>
Núcleo 3	
 <p style="text-align: center;">CIMA</p> <p style="text-align: center;">BASE</p>	<p>Clasificación técnica WRB (2006): Arenosol.</p> <p>Coordenadas X: 794982, Y: 1984278. Altura: 0 msnm. Geoforma: Planicie. Microrelieve: Plano. Pendiente 0.5-1.0 %. Condiciones meteorológicas: Día soleado despejado y sin lluvia en el último mes. Vegetación nativa: Arbustos deciduos, perennes y cultivos (en descripción de flora). Uso del suelo: industrial. Material parental: Roca sedimentaria. Distancia al mar: 25 m. Orientación: S.O.</p> <p>Presencia de humedad, textura arenosa, estructura granular, sin presencia de raíces y diferenciación de capas a lo largo del núcleo.</p> <p>Profundidad: 110.5 cm</p> <p>Submuestras: 24</p> <p>Observaciones: Se encontraron fragmentos de rocas en los centímetros 77 y 108. En la playa había residuos sólidos (PET, plásticos, botellas de vidrios y de aceites).</p>

Tabla 4-6. Descripción general del núcleo 4 y 5

Núcleo 4	
<p>CIMA</p>  <p>0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100 105 110</p> <p>BASE</p>	<p>Fecha: 07/03/14</p> <p>Clasificación técnica WRB (2006): Arenosol.</p> <p>Coordenadas X: 794729, Y: 1984383. Altura: 0 msnm. Geoforma: Planicie. Microrelieve: Plano. Pendiente 0.5-1.0 %. Condiciones meteorológicas: Día soleado despejado y sin lluvia en el último mes. Vegetación nativa: Arbustos deciduos, perennes y cultivos (en descripción de flora). Uso del suelo: industrial. Material parental: Roca sedimentaria. Distancia al mar: 25 m. Orientación: S.O.</p> <p>Presencia de humedad, textura arenosa, estructura granular, sin presencia de raíces y diferenciación de capas a lo largo del núcleo.</p> <p>Profundidad: 108 cm</p> <p>Submuestras: 25</p> <p>Observaciones: Sin presencia de rocas.</p>
Núcleo 5	
<p>CIMA</p>  <p>0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100</p> <p>BASE</p>	<p>Clasificación técnica WRB (2006): Arenosol.</p> <p>Coordenadas X: 794479, Y: 1984504. Altura: 0 msnm. Geoforma: Planicie. Microrelieve: Plano. Pendiente 0.5-1.0 %. Condiciones meteorológicas: Día soleado despejado y sin lluvia en el último mes. Vegetación nativa: Arbustos deciduos, perennes y cultivos (en descripción de flora). Uso del suelo: industrial/turismo. Material parental: Roca sedimentaria. Distancia al mar: 25 m. Orientación: S.O.</p> <p>Presencia de humedad, textura arenosa, estructura granular, sin presencia de raíces y poca diferenciación de capas a lo largo del núcleo</p> <p>Profundidad: 101 cm</p> <p>Submuestras: 20</p> <p>Observaciones: Durante el muestreo el núcleo se dobló por una roca que había entre los 88 y 96 cm</p>

Tabla 4-7. Descripción general del núcleo 6 y 7.

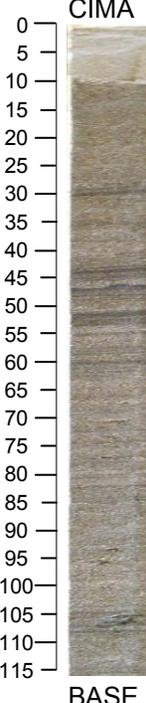
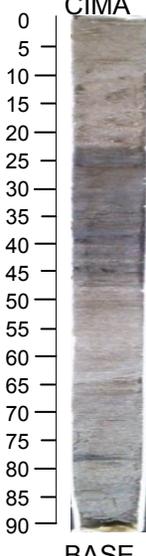
Núcleo 6	
	<p>Fecha: 07/03/14</p> <p>Clasificación técnica WRB (2006): Arenosol.</p> <p>Coordenadas X: 794240, Y: 1984635. Altura: 0 msnm. Geoforma: Planicie. Microrelieve: Plano. Pendiente 0.5-1.0 %. Condiciones meteorológicas: Día soleado despejado y sin lluvia en el último mes. Vegetación nativa: Arbustos deciduos, perennes y cultivos (en descripción de flora). Uso del suelo: industrial/turismo. Material parental: Roca sedimentaria. Distancia al mar: 15 m. Orientación: S.O.</p> <p>Presencia de humedad, textura arenosa, estructura granular, sin presencia de raíces y poca diferenciación de capas a lo largo del núcleo.</p> <p>Profundidad: 116 cm</p> <p>Submuestras: 24</p> <p>Observaciones: núcleo muestreado en zona donde realizan actividades de recreación en la playa.</p>
Núcleo 7	
	<p>Clasificación técnica WRB (2006): Arenosol.</p> <p>Coordenadas X: 793529, Y: 1985039. Altura: 0 msnm. Geoforma: Planicie. Microrelieve: Plano. Pendiente 0.5-1.0 %. Condiciones meteorológicas: Día soleado despejado y sin lluvia en el último mes. Vegetación nativa: Arbustos deciduos, perennes y cultivos (en descripción de flora). Uso del suelo: turismo/agricultura. Material parental: Roca sedimentaria. Distancia al mar: 25 m. Orientación: S.O.</p> <p>Presencia de humedad, textura arenosa, estructura granular, sin presencia de raíces y diferenciación de capas a lo largo del núcleo.</p> <p>Profundidad: 92cm</p> <p>Submuestras: 19</p> <p>Observaciones: En la playa había residuos sólidos (PET, plásticos y botellas de aceite vacías).</p>

Tabla 4-8. Descripción general del núcleo 9 y 10.

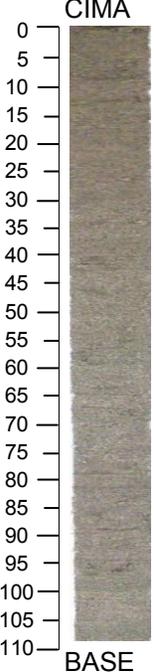
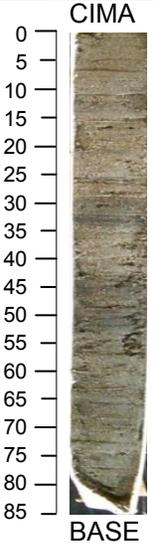
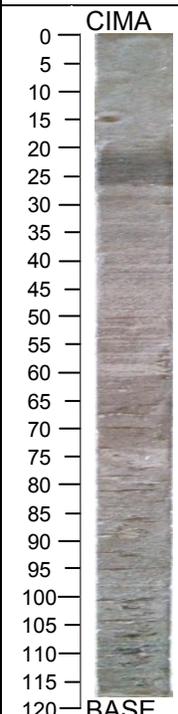
Núcleo 9	
	<p>Fecha: 07/03/14</p> <p>Clasificación técnica WRB (2006): Arenosol.</p> <p>Coordenadas X: 791856, Y: 1985930. Altura: 0 msnm. Geoforma: Planicie. Microrelieve: Plano. Pendiente 0.5-1.0 %. Condiciones meteorológicas: Día soleado despejado y sin lluvia en el último mes. Vegetación nativa: Arbustos deciduos, perennes y cultivos (en descripción de flora). Uso del suelo: agricultura. Material parental: Roca sedimentaria. Distancia al mar: 20 m. Orientación: S.O.</p> <p>Presencia de humedad, textura arenosa, estructura granular, sin presencia de raíces y sin diferenciación de capas a lo largo del núcleo (homogéneo).</p> <p>Profundidad: 108 cm</p> <p>Submuestras: 22</p> <p>Observaciones: De este sitio en adelante se tienen registros previos de análisis de propiedades magnéticas en dos perfiles cercanos a este lugar (Localidad: playa la tortuga).</p>
Núcleo 10	
	<p>Clasificación técnica WRB (2006): Arenosol.</p> <p>Coordenadas X: 790574, Y: 1986696. Altura: 0 msnm. Geoforma: Planicie. Microrelieve: Plano. Pendiente 0.5-1.0 %. Condiciones meteorológicas: Día soleado despejado y sin lluvia en el último mes. Vegetación nativa: Arbustos deciduos, perennes y cultivos (en descripción de flora). Uso del suelo: agricultura. Material parental: Roca sedimentaria. Distancia al mar: 35 m. Orientación: S.O</p> <p>Presencia de humedad, textura arenosa, estructura granular, sin presencia de raíces y poca diferenciación de capas a lo largo del núcleo.</p> <p>Profundidad: 84 cm</p> <p>Submuestras: 17</p> <p>Observaciones: Durante el muestreo el núcleo se dobló por una roca que había entre los 76 y 84cm de profundidad.</p>

Tabla 4-9. Descripción general del núcleo 11.

Núcleo 11	
	<p>Fecha: 07/03/14</p> <p>Clasificación técnica WRB (2006): Arenosol</p> <p>Coordenadas X: 789585, Y: 1987129. Altura: 0 msnm. Geoforma: Planicie. Microrelieve: Plano. Pendiente 0.5-1.0 %. Condiciones meteorológicas: Día soleado despejado y sin lluvia en el último mes. Vegetación nativa: Arbustos deciduos, perennes y cultivos (en descripción de flora). Uso del suelo: turístico/agricultura. Material parental: Roca sedimentaria. Distancia al mar: 35 m. Orientación: S.O.</p> <p>Presencia de humedad, textura arenosa, estructura granular, sin presencia de raíces y poca diferenciación de capas a lo largo del núcleo.</p> <p>Profundidad: 118 cm</p> <p>Submuestras: 24</p> <p>Observaciones: zona de uso recreativo perteneciente a la localidad de Playa azul.</p>

4.2.1 χ_{lf} en submuestras continuas y discretas

Este parámetro magnético se midió de manera continua, cada 2 cm, en los núcleos obtenidos de la playa de Lázaro Cárdenas. En la Fig. 4-15, se observan los valores obtenidos, graficados en conjunto con los valores obtenidos para las muestras discretas de los mismos núcleos, tomadas una vez que éstos perdieron humedad. Se observa la misma tendencia aunque los valores para las muestras discretas son ligeramente mayores. Esto se debe principalmente a dos factores: 1) el volumen de la muestra, 2) el hecho de que los núcleos no se encontraban completamente secos al momento de la medición continua y el agua, al ser diamagnética, disminuye el valor de la susceptibilidad.

Por otro lado, se observa una variabilidad vertical muy diferente entre los núcleos; de los correspondientes al uso de suelo industrial destaca el núcleo 1 con valores máximos que indican un enriquecimiento en minerales magnéticos y una posible

mayor concentración de elementos ajenos a la composición natural de las arenas como podrían ser metales pesados, notándose una mayor concentración entre 25 y 45 cm de profundidad. El máximo a 75 cm en el núcleo 3, en el 4 presenta algunos máximos entre los 50 y 70 cm, siendo una cierta coincidencia valores elevados de la susceptibilidad después de los 45 cm de profundidad, mientras que los núcleos 5 y 6 presentan valores más bajos en relación a los 3 primeros, con máximos en diferente nivel de profundidad. En el área más conservada sobresale el núcleo 7 en el que se observa un enriquecimiento importante en minerales magnéticos que podría indicar una fuente de aporte de material ajeno, diferente al resto los núcleos, y el núcleo 9 que arroja los valores mínimos de susceptibilidad magnética indicando probablemente el menor nivel de contaminación. En los núcleos siguientes que pertenecen a la zona turística, se observa que los núcleos 10 y 11 presentan valores más altos que el 9.

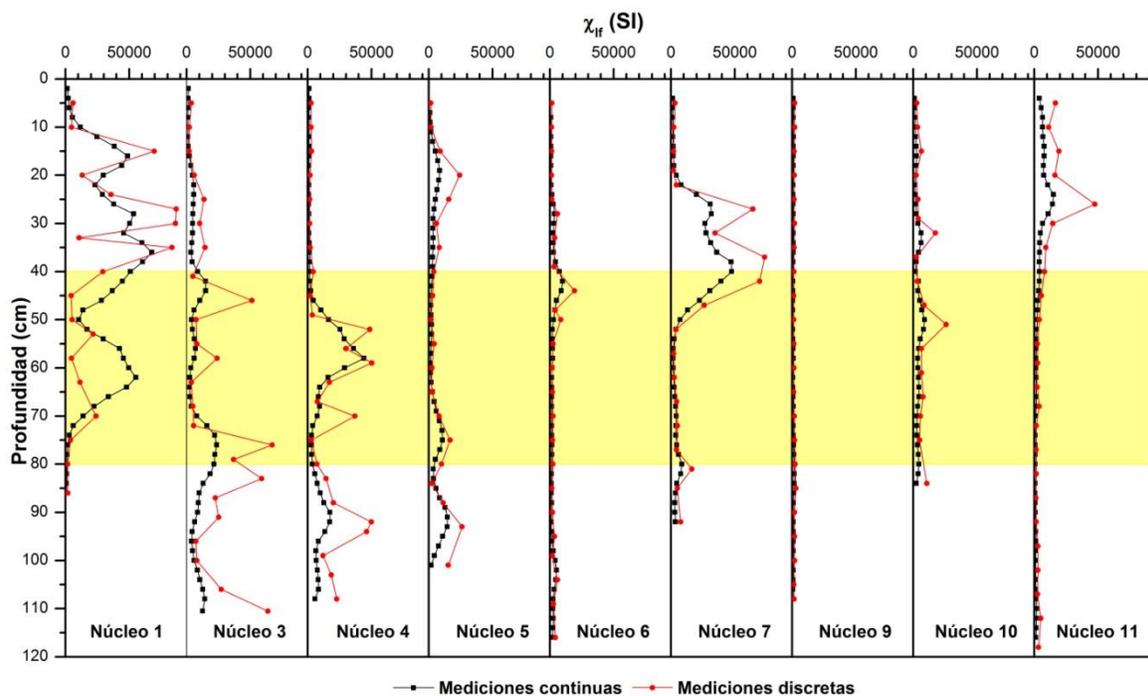


Fig. 4-15. Susceptibilidad magnética en mediciones continuas y discretas de las submuestras obtenidas de los núcleos costeros. La franja amarilla es la profundidad a la que la tortuga negra deposita sus huevos durante el periodo de incubación.

4.2.2 Curvas κ -T

Ya que este tipo de análisis se realiza para determinar la T_C , de modo que podamos inferir el o los portadores magnéticos, no es necesario realizarlo en todas las muestras discretas; a modo de representatividad, se eligieron dos muestras por núcleo, tomando el criterio de los valores extremos de la χ_{lf} . En las figuras 4-16 a 4-20, se muestran las curvas κ -T para las muestras de los nueve núcleos; todas las gráficas superiores corresponden al rango T_{ambiente} a $700\text{ }^\circ\text{C}$ tanto de calentamiento (con línea roja) como de enfriamiento de la misma muestra (con línea azul). Las gráficas inferiores muestran las curvas obtenidas de -200 a $0\text{ }^\circ\text{C}$ (con línea negra). Para un mismo núcleo, la muestra de la izquierda es la de valor máximo de χ_{lf} , mientras que la de la derecha es la de valor mínimo. Para identificar las muestras analizadas se utilizó el código siguiente: Núcleo x (y), donde x es el número de núcleo y y es el número de submuestra.

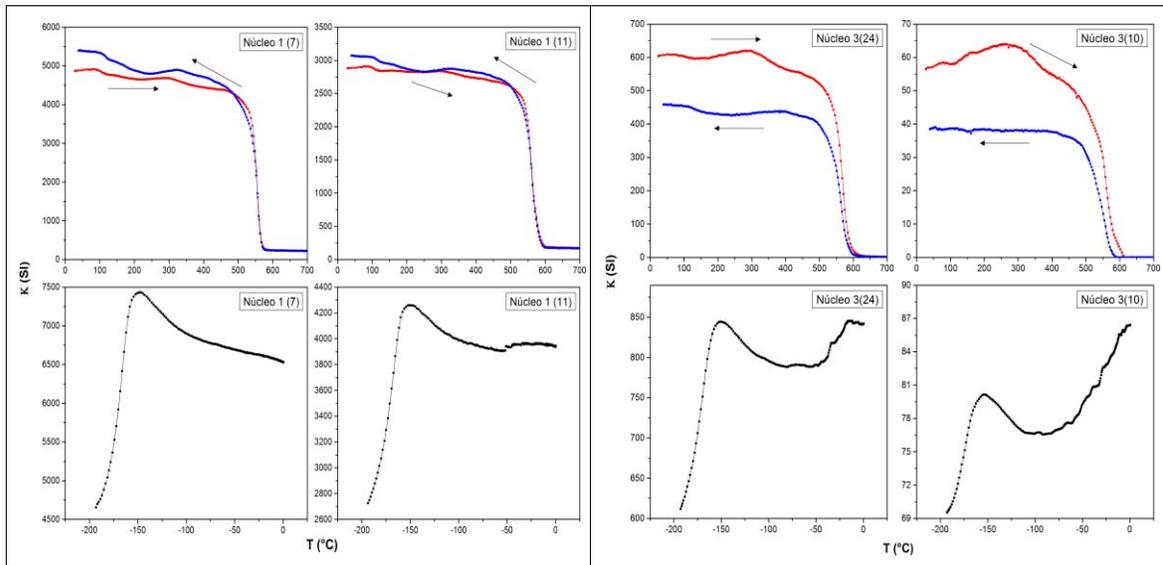


Fig. 4-16. Curvas κ -T del Núcleo 1 y Núcleo 3. Entre paréntesis se indica el número de submuestra.

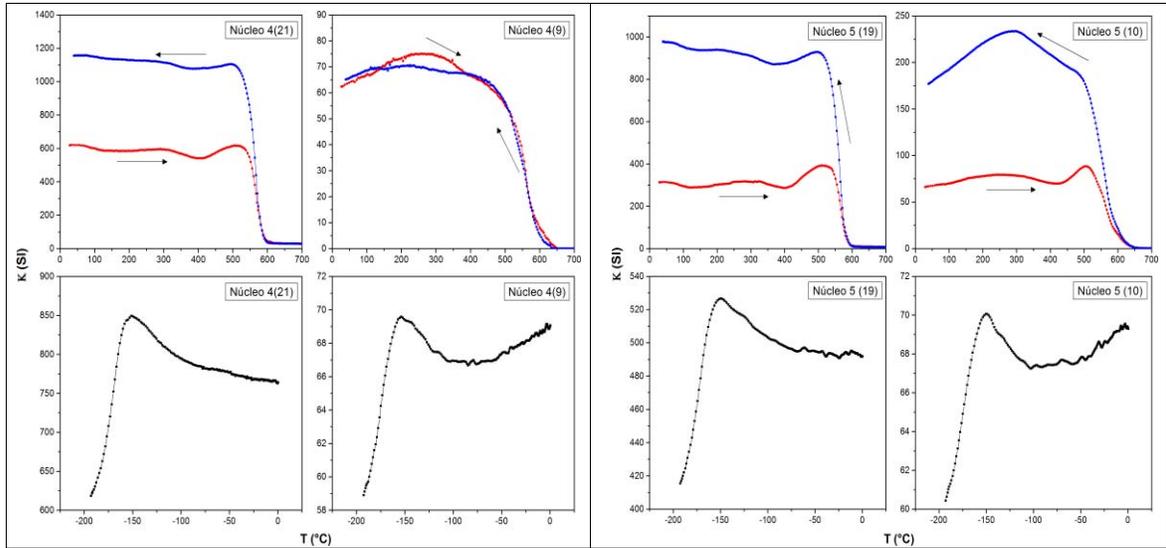


Fig. 4-17. Curvas κ -T del Núcleo 4 y Núcleo 5. Entre paréntesis se indica el número de submuestra.

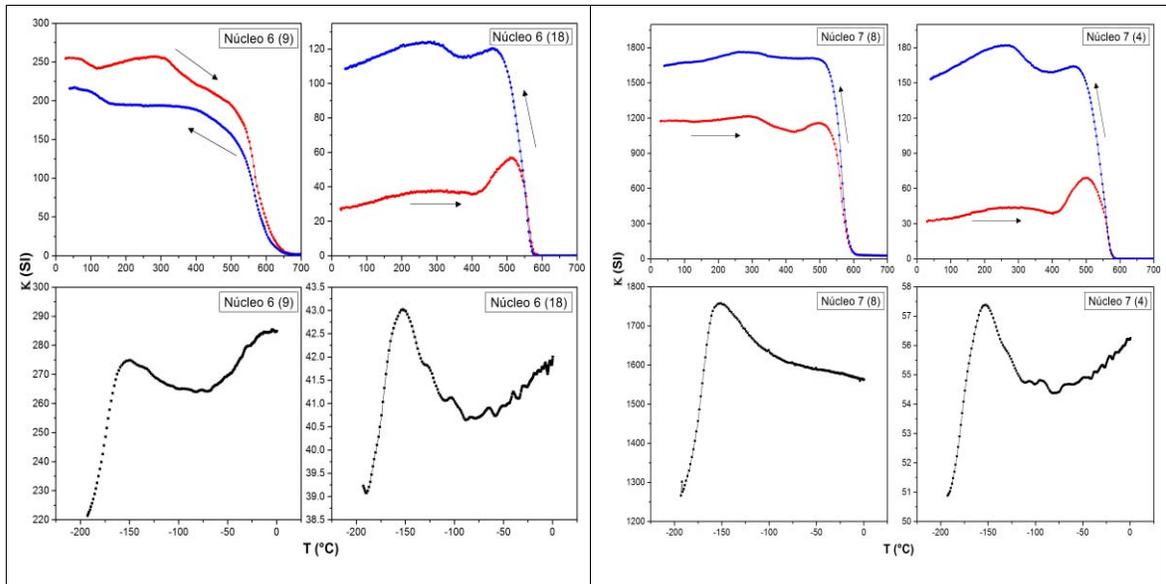


Fig. 4-18. Curvas κ -T del Núcleo 6 y Núcleo 7. Entre paréntesis se indica el número de submuestra.

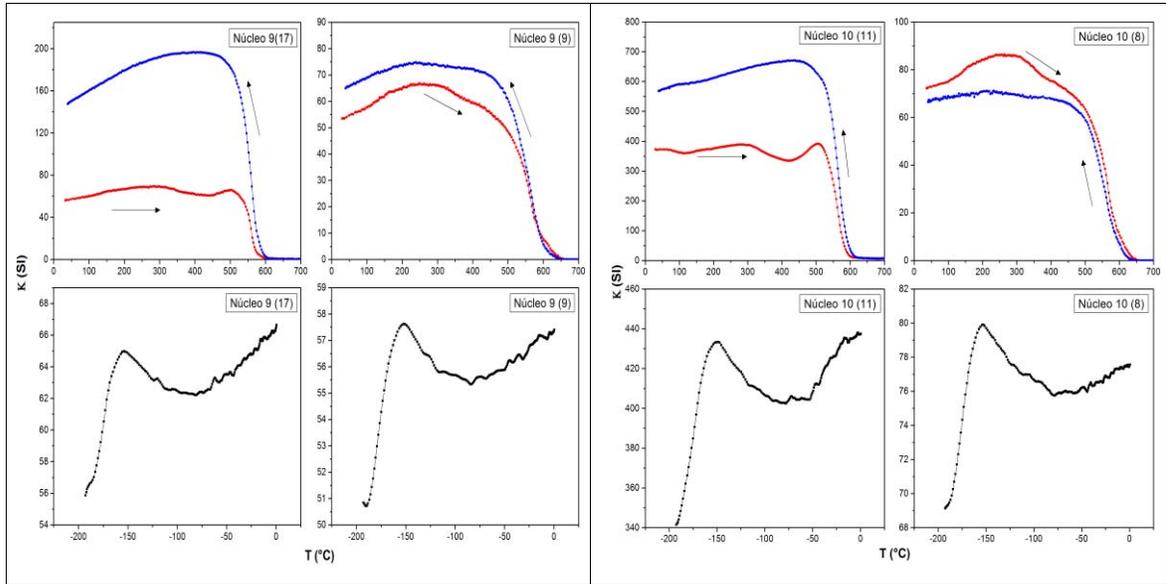


Fig. 4-19. Curvas κ -T del Núcleo 9 y Núcleo 10. Entre paréntesis se indica el número de submuestra.

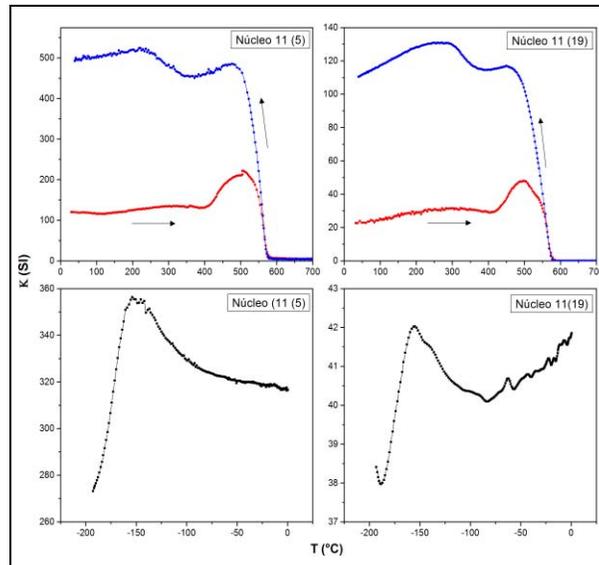


Fig. 4-20. Curvas κ -T del Núcleo 11. Entre paréntesis se indica el número de submuestra.

La inminente presencia de magnetita es observado por su comportamiento típico debido a la T_C de $\sim 580^\circ\text{C}$ en las curvas termomagnéticas. En la mayoría de las curvas de comportamiento irreversible, se observa un aumento abrupto en la susceptibilidad magnética durante el calentamiento, con un máximo alrededor de los

500 °C, el cual ha sido identificado en estudios previos como característico en muestras de suelo contaminado (Aguilar et al., 2011; Jeleńska et al., 2004).

También se observa en la mayoría de las curvas de enfriamiento, valores más altos con respecto a la curva de calentamiento. Esto puede explicarse por la conversión de óxidos de hierro a magnetita (en el caso del núcleo 11) en presencia de materia orgánica (Hanesch et al., 2003). Este incremento de la susceptibilidad es sustancialmente más alto en las zonas más conservadas que en las zonas cercanas a la industria. Las curvas que muestran claramente un aumento de los valores en la curva de enfriamiento corresponden principalmente a los núcleos 5, 7, 9 y 11.

Las curvas k-T del núcleo 1 y una del núcleo 4 (la de valor más bajo en susceptibilidad) presentan comportamiento reversible, que indica la estabilidad de los minerales magnéticos presentes. Las temperaturas de Curie variaron desde 580 °C hasta ~610 °C (valores obtenidos de las curvas de calentamiento), lo cual indica que la magnetita es el principal portador magnético en todos los casos y también posiblemente maghemita para las muestras con T_C mayores. Las T_C estimadas para estas muestras son ligeramente mayores que para la magnetita pura (Dunlop y Ozdemir, 1997).

4.2.3 Curvas de ARM

En la Fig. 4-21, se presentan las curvas de adquisición de ARM para las muestras seleccionadas con valores máximos de χ_{if} por cada núcleo; se observa claramente que hay una tendencia similar a la observada en los valores de susceptibilidad magnética, puesto que los valores más altos corresponden a los núcleos más cercanos a la zona industrial (1, 3 y 4), excepto por el núcleo 7 que no sigue esta tendencia de variación horizontal decreciente, sino que muestra un aumento. Cabe señalar que en este punto existe una zona de descarga de desechos (Fig. 2-5), por lo que es evidente la afectación debido a una fuente puntual diferente a la industria; en este sentido, es importante mencionar que los aceites lubricantes presentan niveles considerables de Zn, B, Mn y Ca (Ulrich et al., 2012), por lo que es de esperarse un

nivel alto de estos elementos en los resultados del análisis químico. Por último, el núcleo 9 se mantiene arrojando los valores más bajos.

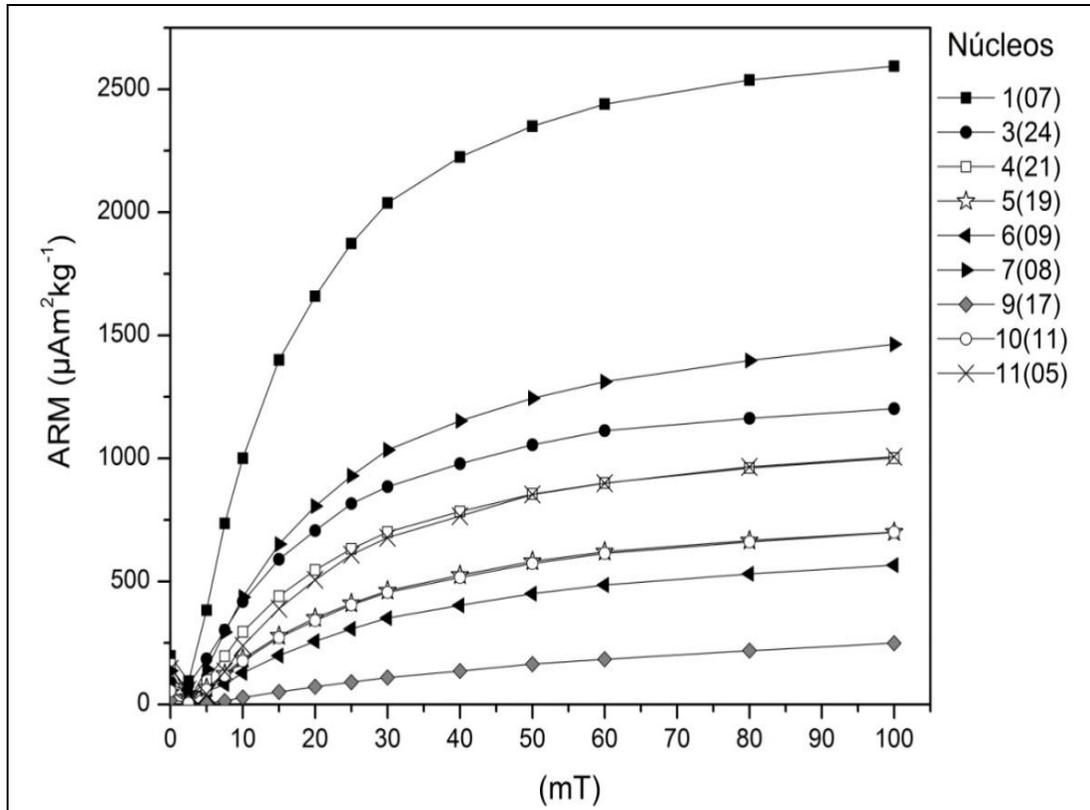


Fig. 4-21. Curvas de adquisición de ARM para muestras seleccionadas de acuerdo a los valores más altos de χ_{if} .

En la Fig.4-22, observamos las curvas de adquisición de ARM para las muestras con los valores mínimos de χ_{if} de cada núcleo. Se nota una gran diferencia entre el núcleo 1 y el resto de los núcleos, con valores hasta 16 veces más altos. Enseguida el núcleo 3 y en el mínimo se agrupa el resto de los núcleos. En relación a éstos, el núcleo 1 presenta valores hasta 8 veces mayores.

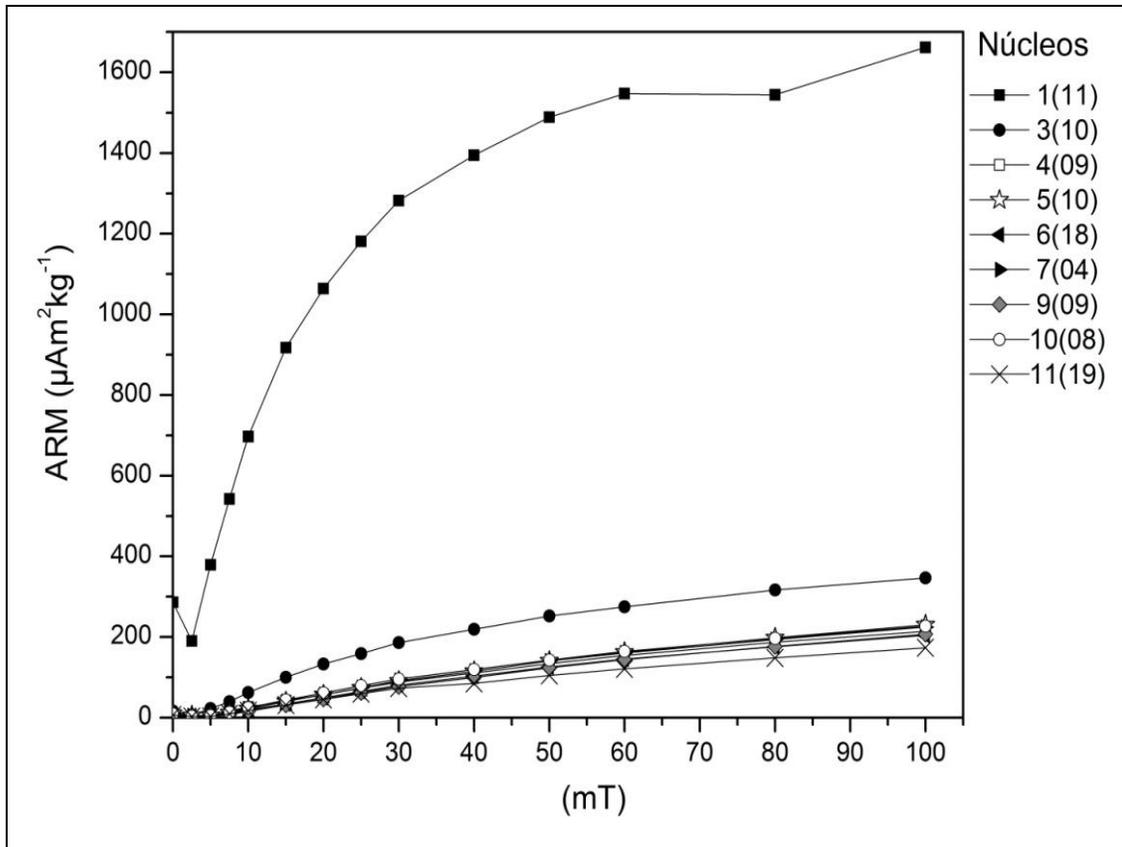


Fig.4-22. Curvas de adquisición de ARM para muestras seleccionadas de acuerdo a los valores más bajos de χ_{if} .

4.2.4 NRM, ARM y $\chi_{fd}\%$ en sedimentos costeros

En esta parte, se presentan a detalle las gráficas de variación horizontal de diversos parámetros magnéticos, para los diferentes núcleos: 1 (Fig. 4-23 a), 3 (Fig. 4-23 b), 4 (Fig. 4-24 a), 5 (Fig. 4-24 b), 6 (Fig. 4-25 a), 7 (Fig. 4-25 b), 9 (Fig. 4-26 a), 10 (Fig. 4-26 b), y 11 (Fig. 4-27). En general se observa para todos los núcleos que valores de χ_{if} y ARM coinciden en la tendencia, indicando directamente la concentración de minerales magnéticos, sin gran cantidad de paramagnéticos, ya que en caso de que los hubiera, se tendrían valores contrastantes de baja χ_{if} con valores altos de ARM. Por otro lado, exceptuando el núcleo 1, todos los demás núcleos muestran valores de $\chi_{fd}\%$ menores a 5%, lo cual nos indica escasa presencia de granos SP, lo cual es un indicador de poca actividad pedogénica. Para ello, los valores tendrían que ser mayores a ~10%. Observamos que los valores para el núcleo 1 son varios órdenes

de magnitud mayores que para los núcleos 9, 10 y 11 (más alejados de la zona industrial).

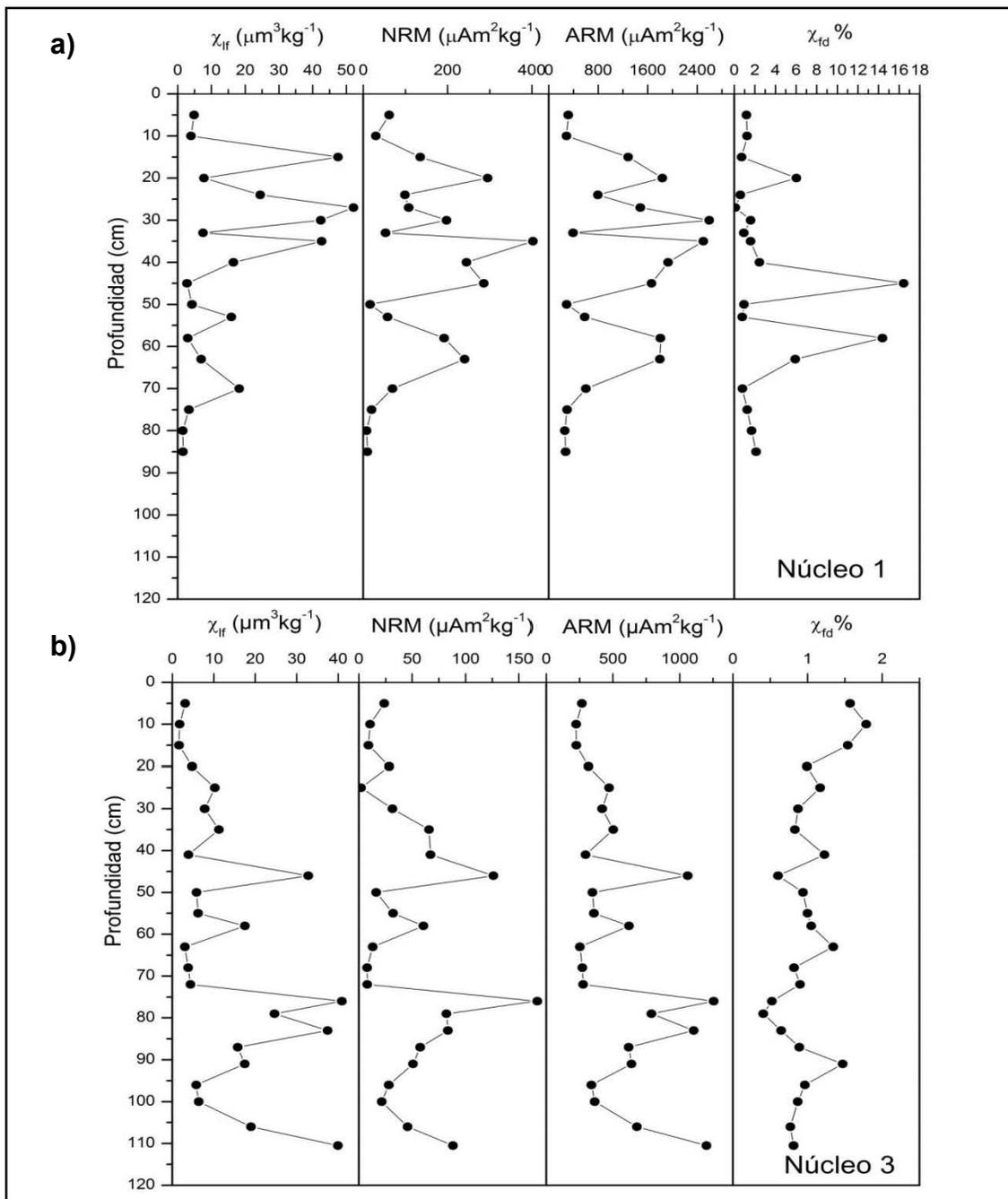


Fig. 4-23. Variación a profundidad de los diferentes parámetros magnéticos medidos en: a) Núcleo 1 y b) Núcleo 3.

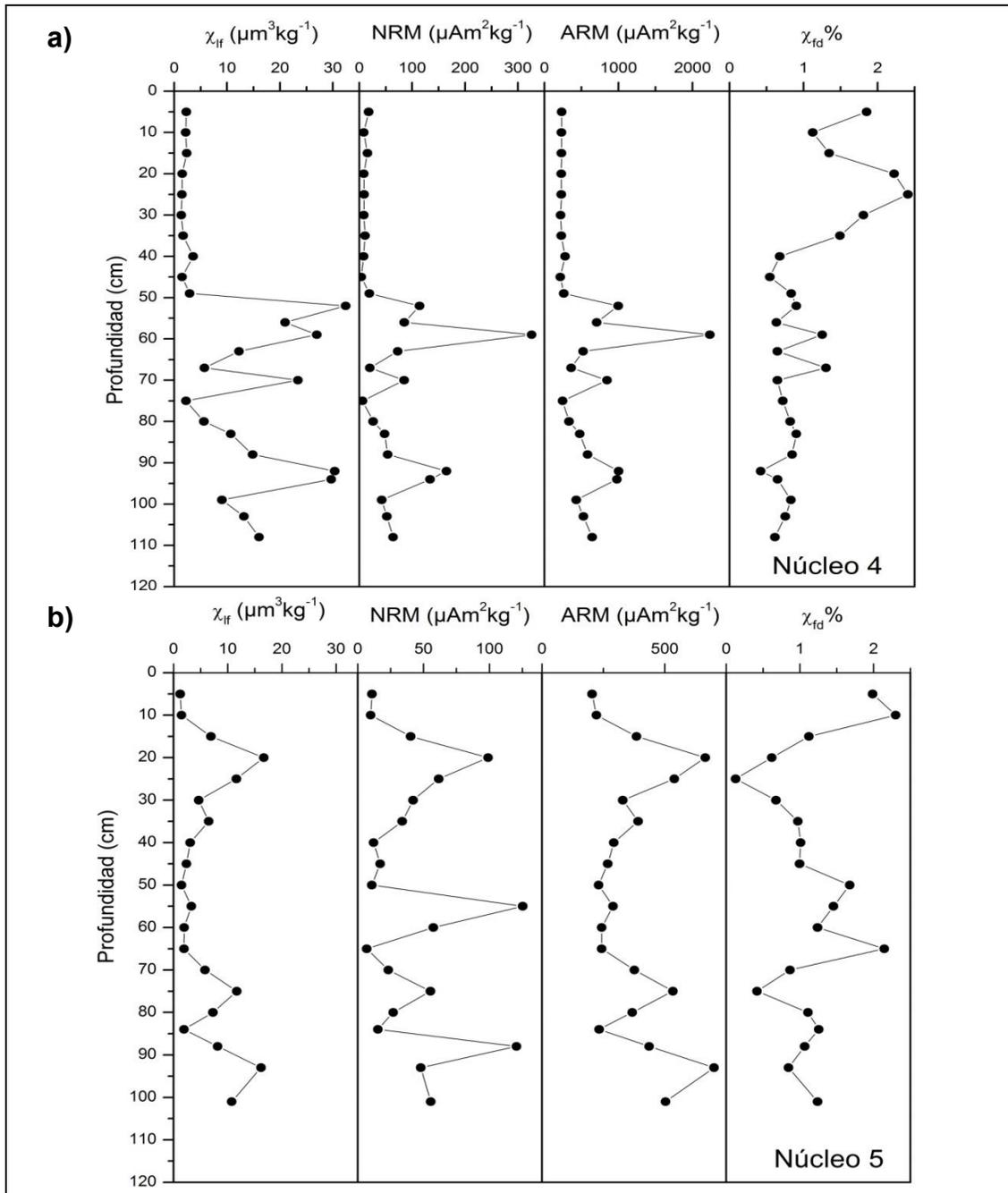


Fig. 4-24. Variación a profundidad de los diferentes parámetros magnéticos medidos en: a) Núcleo 4 y b) Núcleo 5.

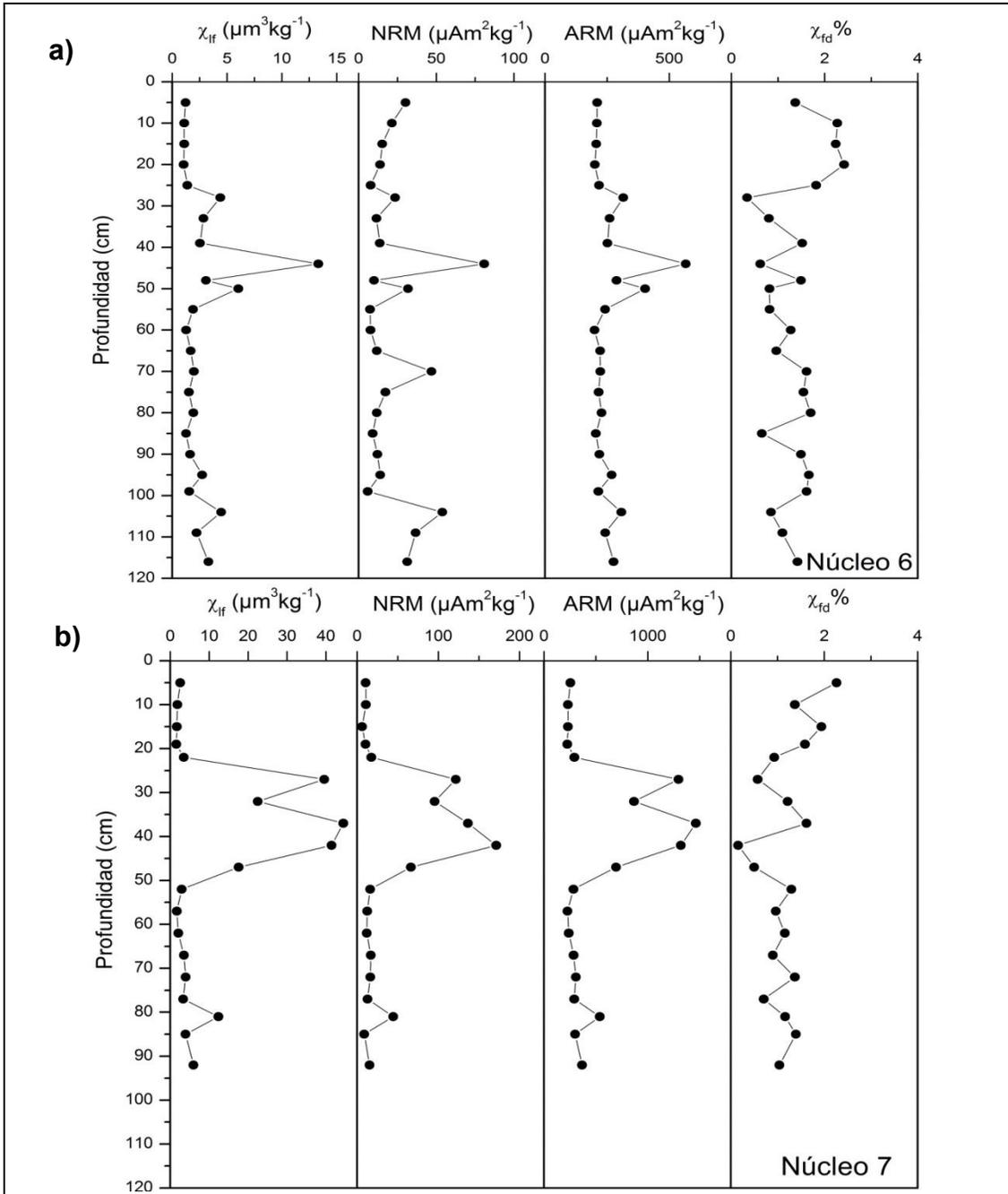


Fig. 4-25. Variación a profundidad de los diferentes parámetros magnéticos medidos en: a) Núcleo 6 y b) Núcleo 7.

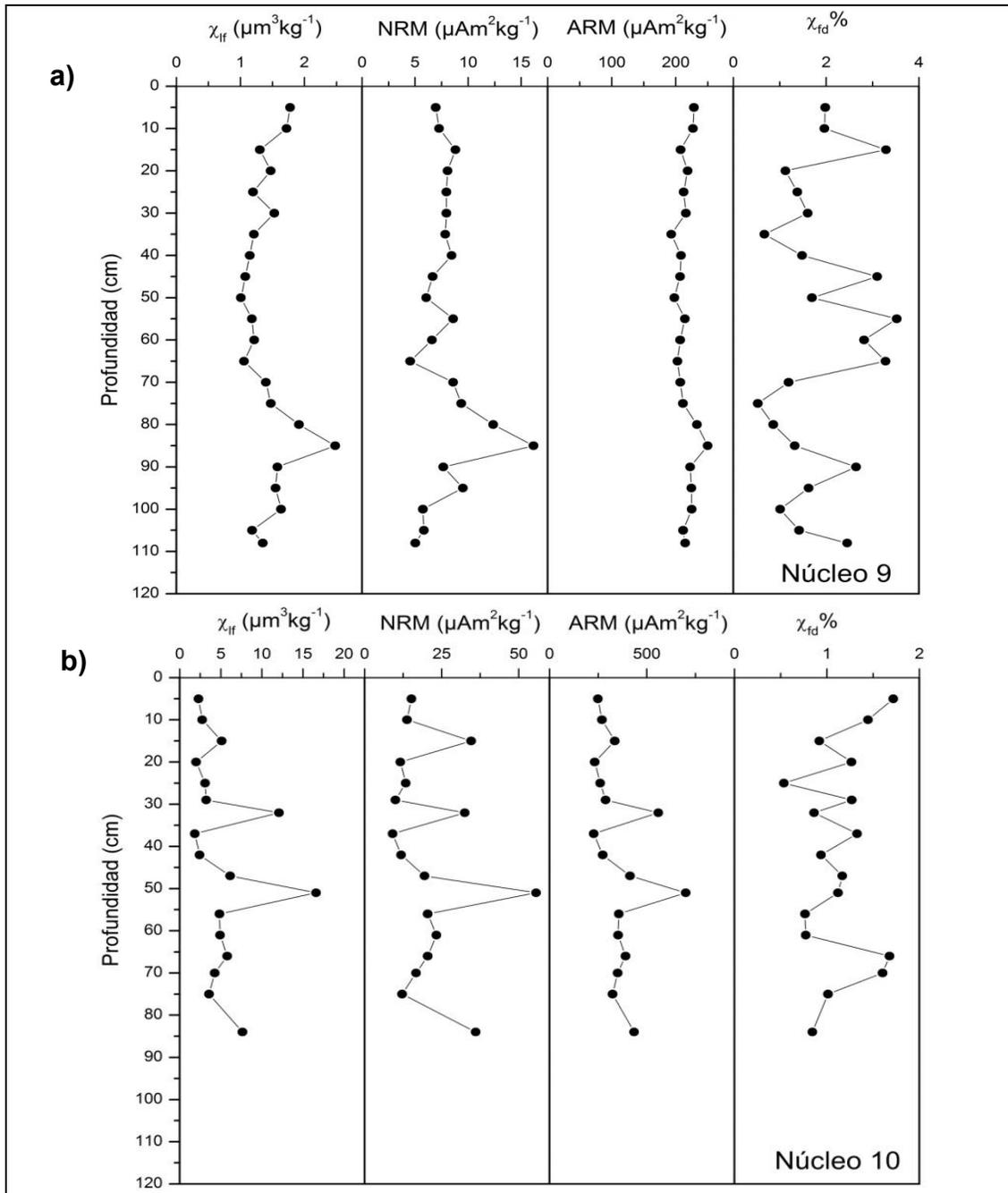


Fig. 4-26. Variación a profundidad de los diferentes parámetros magnéticos medidos en: a) Núcleo 9 y b) Núcleo 10.

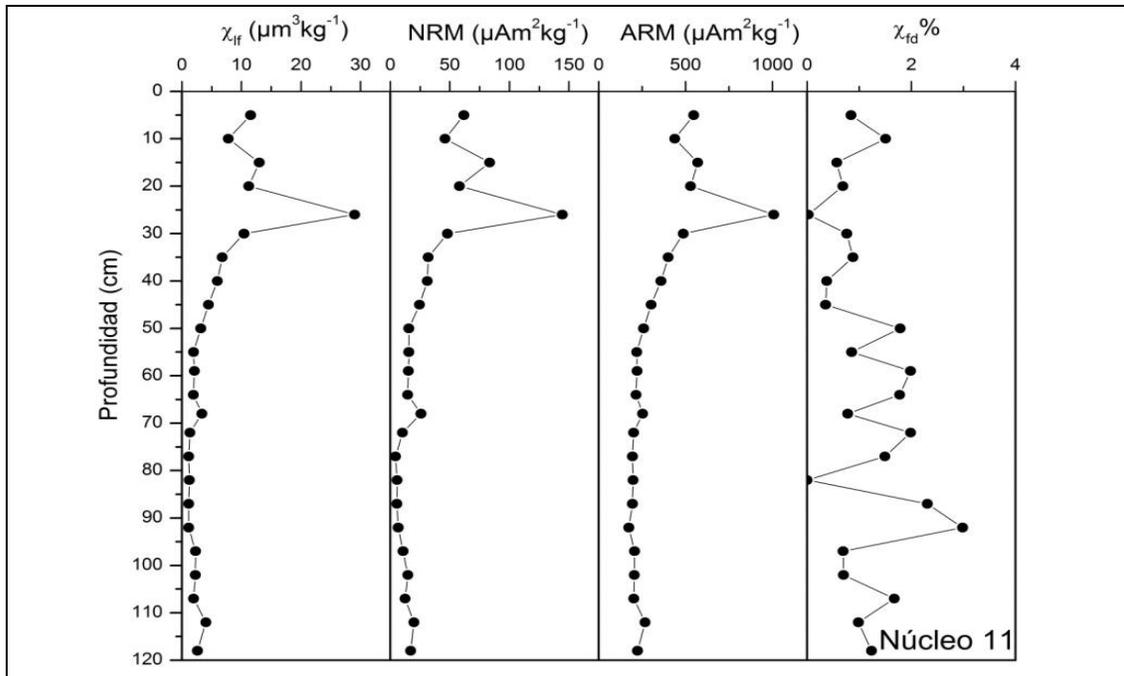


Fig. 4-27. Variación a profundidad de los diferentes parámetros magnéticos medidos en: Núcleo 11.

Los resultados obtenidos de χ_{f} así como de NRM y ARM, muestran perfiles similares en cada núcleo, mostrando las zonas de mayor concentración de minerales magnéticos. Es claro que muestran una disminución de los valores conforme los núcleos se alejan de la zona industrial. La zona cercana a la industria (núcleo 1), que se encuentra más afectada por contaminantes, presenta valores hasta 400 veces altos que el núcleo más uniforme. Estos valores tan altos son derivados no solo de la industria metalúrgica sino del resto de las industrias que lo componen (terminales de carbón, fertilizantes, entre otras).

Entre los núcleos 5 y 7 se detecta una presencia de minerales diamagnéticos que disminuyen el valor de la χ_{f} . Se presenta una tendencia de menor acumulación de minerales magnéticos en cuanto nos alejamos de la zona industrial lo cual nos indicaría aparentemente que los núcleos están más conservados. Estaríamos hablando de los núcleos 7 y 9; sin embargo, comparando con resultados obtenidos para otras playas de la región (Fragoso, 2013), estas arenas no están libres de contaminantes. En los núcleos 10 y 11 se incrementan nuevamente los valores de los parámetros, debido a la actividad turística que hay en estos sitios.

4.2.5 Metales pesados

La zona costera es patrimonio cultural y económico, en la cual el mal uso de suelo y las malas políticas públicas, han tenido consecuencias sociales, económicas y ecológicas que podrían tornarse irreversibles si no se realiza un tratamiento necesario. La Tabla 4-10 muestra las concentraciones detectadas en las submuestras seleccionadas de los núcleos costeros.

Tabla 4-10. Muestras de sedimentos costeros determinados mediante FRX (mg kg⁻¹ material seco).

Muestra	Sr	Ba	Zr	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
LC01-04	126	97	1777	1202	675	116	169	12	194	20
LC01-07	62	0	2386	1751	1005	161	202	10	283	30
LC01-09	53	12	3010	2033	1083	178	143	10	298	27
LC01-11	144	139	1103	950	573	123	123	8	154	16
LC03-10	317	366	226	160	151	38	71	15	68	12
LC03-24	196	161	701	582	474	84	185	9	131	15
LC04-09	332	417	107	78	54	36	29	13	48	10
LC04-13	84	50	2281	1584	970	143	205	11	258	30
LC04-21	150	88	888	699	836	107	315	10	185	17
LC05-04	247	214	639	411	466	74	214	13	136	14
LC05-10	324	378	115	96	87	36	44	12	55	11
LC05-19	162	79	631	631	818	98	367	13	198	20
LC06-09	206	144	734	528	602	82	263	11	159	18
LC06-18	344	381	104	81	69	39	36	12	49	10
LC07-04	356	358	127	110	101	38	52	14	61	12
LC07-08	146	81	1450	897	849	115	286	13	207	22
LC07-09	113	69	2149	1221	1217	130	269	12	244	25
LC09-09	337	430	95	69	44	37	22	14	45	10
LC09-14	336	373	151	112	108	40	56	15	60	12
LC10-07	198	142	651	518	646	86	282	13	162	17
LC10-08	376	397	101	93	82	29	43	16	60	12
LC10-11	204	106	640	568	890	94	390	14	198	18
LC11-05	192	110	954	618	829	98	308	14	180	19
LC11-11	325	338	139	109	91	39	43	13	57	11
LC11-19	360	401	99	82	58	29	31	14	52	13

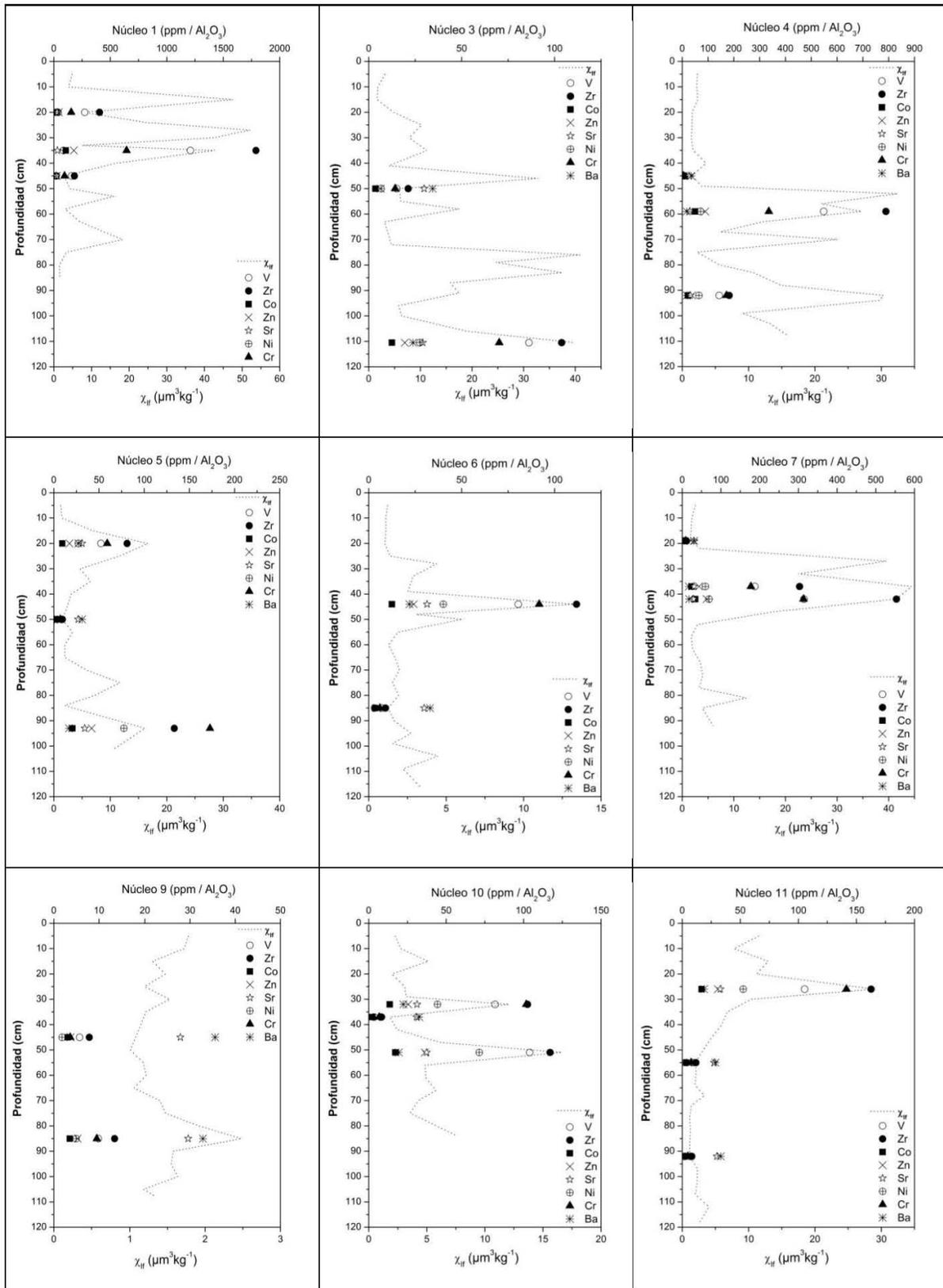


Fig. 4-28. Presencia de metales pesados detectados a diferentes profundidades en los núcleos.

Cabe señalar que los niveles de estos metales pesados superan los determinados en Playa Azul, localidad perteneciente al municipio de Lázaro Cárdenas (Fragoso, 2013). Los altos niveles encontrados no solo representan un riesgo al ser humano; tomando en cuenta que la zona debería conservarse por ser sitio de incubación de especies como la tortuga negra que está en estado de conservación, estos niveles sobrepasan los límites de tolerancia para que dicha especie se reproduzca.

La Fig. 4-28 de los núcleos de Lázaro Cárdenas muestra claramente que los núcleos 1 y 4 se ven muy afectados por la actividad industrial aunque notablemente las concentraciones detectadas de metales pesados del núcleo 1 superan el doble al núcleo 4, razón por la cual desde el establecimiento de la industria ha disminuido notablemente el número de visitas por año de la especie de tortuga negra. A simple vista se podría pensar que el resto del núcleos están menos contaminados, sin embargo el núcleo 9 que tiene los valores más bajos de χ_{if} y metales pesados no es un sitio ideal de anidación para las tortugas marinas debido a que en la profundidad de 45 cm presenta concentraciones de Sr y Ba que pueden ser absorbidos por la humedad de los huevos (Mortimer, 1995).

La presencia de Pb en los nidos de tortugas también es un problema, ya que este metal es absorbido por los huevos y afecta a su desarrollo embrionario, incluso algunas crías de tortugas marinas llegan a ser afectadas portando en el tejido muscular esta bioacumulación después de haber eclosionado (Storelli y Marcotrigiano, 2003). Hay que señalar que este elemento es de origen exclusivamente antrópico.

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

5.1 Discusión

5.1.1 Polvo urbano y Suelo superficial

Las diferencias en los valores de los parámetros magnéticos medidos, reflejan distintos niveles de contaminación relativa entre los diferentes tipos de uso de suelo urbano. Se observa una diferencia importante en las zonas con los valores más altos, al comparar entre muestras de polvo y de suelo; esto se debe a que cada uno de estos tipos de muestra acumula contaminantes en periodos de tiempo distintos. El polvo muestra acumulaciones de días a semanas, mientras que el suelo indica periodos más largos de acumulación de estas partículas contaminantes (Aguilar et al., 2013).

Los resultados de los parámetros magnéticos de las 85 muestras de polvo urbano y las 89 muestras de suelo superficial mostraron una gran diferencia en cuanto a los sitios más contaminados de acuerdo a esta condición, y la diferencia principal viene del hecho de que el polvo es más susceptible de ser removido; existen zonas en la ciudad que están más cuidadas y saneadas: esto se observó desde el momento del muestreo en que se encontraban los sitios con un exceso de polvo en las superficies y en otros en el que el material era escaso.

Los valores calculados de $\chi_{fd}\%$ sitúan a las muestras como muy bajas en contenido de minerales SP, mostrando poca actividad pedogénica y alto aporte de partículas provenientes de procesos de combustión de combustibles fósiles. La presencia de magnetita en todas las muestras y posiblemente pocos casos de suelo con maghemita. Se atribuye justamente a procesos de neoformación de este mineral por fuentes antropogénicos (Aguilar et al., 2011; Jelenska et al., 2004).

Mediante las curvas de ARM se identificaron los valores máximos para el tipo de uso de suelo industrial en el caso de suelo, lo que indica que a lo largo de los años la industria es lo que ha provocado la mayor generación de partículas contaminantes.

Aunque aparentemente, por el resultado obtenido del análisis de polvo urbano, el tipo de uso de suelo con mayor nivel de contaminantes es el mixto, las observaciones directas dejan claro que la zona industrial se conserva “limpia”, por lo que el resultado obtenido del suelo en este caso refleja fielmente el nivel de generación de partículas contaminantes.

Las correlaciones lineales observadas entre los parámetros χ y ARM con la mayoría de los metales pesados analizados, de acuerdo al valor de r^2 con un alto grado de significancia cercano a 1 (Zhang et al., 2007), nos confirman que dichos parámetros pueden ser utilizados de forma directa en la evaluación rápida de puntos críticos de contaminación, ya que señalan directamente la presencia de algunos contaminantes específicos.

Las concentraciones de metales pesados determinadas en muestras de polvo urbano y suelo superficial, de acuerdo con la NOM 147-SEMARNAT, sobrepasan los límites máximos permisibles de Pb, V, Ni y Cr, y de acuerdo con la NOM 021-SEMARNAT, los límites para Cu y Zn. Estos EPT persisten en el ambiente de la zona urbana, y a través de la bioacumulación representan un gran riesgo para el ambiente y la salud humana (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, LGEEPA) (Wong-González, 2009).

5.1.2 Sedimentos costeros

Los resultados de las mediciones de los parámetros magnéticos en los sedimentos marcan claramente máximos en los niveles donde efectivamente se encontraron valores elevados de concentración de metales pesados. La evaluación de estos contaminantes es importante no solo por el riesgo a la salud humana (lo cual es evidente por ser zona de recreación), sino también por las especies que habitan ahí y se encuentran en peligro de extinción como la tortuga negra.

De los resultados se destaca lo siguiente:

El sitio más contaminado es el del núcleo 1, el cual presentó las concentraciones máximas de Zr, V, Cr, Co, Ni, Zn y Pb. Considerando la profundidad a la que la tortuga

negra desova se establece el núcleo 9 como el sitio más apto y menos contaminado para la anidación de ésta especie, ya que presentó la concentración mínima de Pb, Ni, Cr, V, Zr y Zn; aunque de éste último presenta las concentraciones más bajas (45 mg kg^{-1}) en comparación con el resto de los núcleos analizados, estudios previos señalan que el Zn detectado en las cáscaras de huevos de tortuga verde (*Chelonia mydas*) es de 1.2 con un rango de: $0.3\text{-}2.6 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabla 2-3) para que éste efectúe su desarrollo embrionario sin perturbación alguna y llegue a la eclosión sanamente (Storelli y Marcotrigiano, 2003). El resto de las concentraciones de éste núcleo se encuentran dentro de las concentraciones promedio permitidas por la EPA (2007) en suelos (Tabla 2-2).

El sitio intermedio y con posibles condiciones favorables para el desove de la tortuga negra es el Núcleo 11 (extraído del área turística); aquí se detectaron algunas concentraciones elevadas que sobrepasan los límites permitidos por la EPA (2007) en la superficie del núcleo: Zn, Ni, Co, Cr, V y Zr (Tabla 4-10); sin embargo, a partir de los 40 cm de profundidad el núcleo presentó concentraciones que no llegan a ser perjudiciales para el desarrollo de las crías de tortugas marinas (Storelli y Marcotrigiano, 2003).

El resto de los núcleos presentan condiciones no aptas para el desarrollo de especies de tortuga marina. Cabe mencionar que la CONAGUA a través del órgano auxiliar “Comité de Playas Limpias de Lázaro Cárdenas” del Consejo de Cuenca del Río Balsas, con apoyo técnico de la Cofepris (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios), realiza actividades y acciones necesarias para la obtención de la certificación de las playas de Lázaro Cárdenas desde el punto de calidad de agua, que consiste en declararlas como “*aptas*” para la recreación humana, realizando monitoreos previos a los periodos vacacionales que cuantifican las concentraciones de la bacteria *Enterococcus faecalis* (unidades de microorganismos por cada 100 ml de agua) como uno de los indicadores microbiológicos de contaminación del mar; sin embargo, estas instituciones oficiales no han emitido alertas a la población acerca del nivel de contaminación de la playa por metales pesados.

5.2 Conclusión

Las técnicas del magnetismo ambiental aplicadas en las muestras de polvo y suelo urbanos permitieron realizar una evaluación de la contaminación presente en la ciudad de Lázaro Cárdenas, lo cual derivó en los siguientes resultados:

En el tipo de uso de suelo industrial se determinaron las mayores concentraciones de Zr, Zn, Cr, Pb y Ni, además de que estas concentraciones presentan una fuerte correlación con los parámetros de χ_{lf} y ARM. La contaminación que se origina a partir de la combustión del combustible fósil se acumula en el suelo de la ciudad de manera puntual y por prolongados periodos de tiempo en las vialidades principales. Otra fuente adicional que se logró identificar es la contribución de contaminantes transportados por el río Balsas.

Mediante las interpolaciones se logró visualizar la información sobre la contaminación existente a corto plazo (en polvo urbano) debido a que en periodos cortos el material se puede llegar a remover por fenómenos naturales y/o inducidos y presenta una distribución espacial diferente en relación a las muestras de suelo. La distribución espacial de las dos variables de parámetros magnéticos con fuerte autocorrelación de dependencia espacial, resultó ser una herramienta rápida y eficaz debido a que los mapas de polvo y suelo de Lázaro Cárdenas indican puntos críticos o con mayor afectación por la contaminación ambiental.

Los resultados de estos estudios, mostraron que las concentraciones de metales tóxicos en los nidos de tortugas marinas, en este caso enfocado a la tortuga negra, sobrepasan los niveles de tolerancia, siendo muy elevadas para metales pesados como el Pb, Zr, Cr, V, Ba, Ni y Sr, afectando la salud de estas especies en peligro de extinción, especialmente cuando se comparan con los de otros organismos marinos de larga vida. Sin embargo, debido a la falta de estudios sobre los efectos tóxicos de estos contaminantes ambientales sobre las poblaciones de tortugas marinas, son pocos los monitoreos que existen en torno a periodos de incubación y el éxito de eclosión. Hay una clara necesidad de aumentar la cantidad relativamente pequeña

de datos sobre contaminantes químicos y sus efectos fisiológicos en las tortugas marinas en un esfuerzo por conservar sus poblaciones.

Las submuestras analizadas con FRX presentaron elevadas concentraciones de metales pesados, lo que señala que la costa de Lázaro Cárdenas se ha convertido en una playa poco apta para la anidación y desove de los huevos de tortuga negra, ya que puede en algunos casos ocasionar la interrupción durante el desarrollo de los huevos, y además tiene un impacto en el número de individuos a aumentar ya que llega a poner en peligro la supervivencia de una población y el equilibrio entre especies del mismo ecosistema. Las altas concentraciones de metales pesados afectan no solo a especies en peligro de extinción, sino al ser humano mismo.

Se probó la metodología magnética como un método alternativo de fácil aplicación para el monitoreo de los niveles de contaminación ya que se observó una relación directa entre los valores más elevados de los parámetros magnéticos medidos con los niveles más altos de metales pesados.

Bibliografía consultada

- Aguilar, B., Bautista, F., Gogichaishvili, A., Morton, O., 2011a. Magnetic monitoring of top soils of Merida (Southern Mexico). *Stud. Geophys. Geod.* 55, 377–388.
- Aguilar, B., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., Contreras, J.J., Quintana, P., Carvallo, 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 Int.*
- Aguilar, B., Bautista, F., Rosas-Elguera, J., Gogichaishvili, A., Cejudo, R., Morales, J., 2011b. Evaluación de la contaminación ambiental por métodos magnéticos en las ciudades de Morelia y Guadalajara México. *Latinmag Lett.* 1, D22.
- Ahmed, S., Rahman, S.M., 2000. Trace Metals in Soil-Plant Systems under Tropical Environment, in: Iskandar, I.K. (Ed.), *Environmental Restoration of Metals-Contaminated Soils*. CRC Press, United States of America, p. 291.
- Alvarado, J., Delgado, C., 2005. Tortugas marinas de Michoacán. historia Natural y Conservación. U.M.S.N.H. y Comisión de pesca del estado de Michoacán., Morelia, Mich. México.
- APILAC, A.P.I. de L.C.S.A. de C.V., 2009. Manifestación de Impacto Ambiental, Modalidad Regional para el desarrollo de infraestructura portuaria de APILAC. Presentada a SEMARNAT, AAPROFEPA 009-14/06.
- Bautista, F., 1999. Introduccioón al estudio de la contaminación de suelo por metales pesados. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.
- Bityukova, L., Scholger, R., Birke, M., 1999. Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soils in Tallinn. *Phys. Chem. Earth Part Solid Earth Geod.* 24, 829–835.
- Blundell, A., Hannam, J.A., Dearing, J.A., Boyle, J.F., 2009. Detecting atmospheric pollution in surface soils using magnetic measurements: A reappraisal using an England and Wales database. *Environ. Pollut.* 157, 2878–2890.

Bocourt, 1868. The Reptile Database. Accessed through: Land J. van der UNESCO-IOC Register of Marine Organisms (URMO). URL <http://www.marinespecies.org/Urmo/aphia.php?p=taxdetails&id=343989> on 2015-09-25

Botello, A., 2001. La contaminación marina y la urgencia de su legislación.

Boudou, A., Ribeyre, F., 1989. Aquatic ecotoxicology: fundamental concepts and methodologies. CRC press, Boca Raton (Florida).

Burrough, P.A., McDonnell, R.A., 1998. Principles of Geographical Information Systems., Oxford Univ. Press. ed. New York, USA.

Butler, R.F., 1992. Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Blackwell Science, Boston.

Chaparro, M.A.E., Lirio, J.M., Nuñez, H., Gogorza, C.S.G., Sinito, A.M., 2005. Preliminary magnetic studies of lagoon and stream sediments from Chascomús Area (Argentina)—magnetic parameters as indicators of heavy metal pollution and some results of using an experimental method to separate magnetic phases. Environ. Geol. 49, 30–43.

CONAGUA, 2010. Estadísticas del Agua en la cuenca del Río Balsas, 2010. México, D.F.

Correa, P.G., 1974. Geografía del estado de Michoacán. Geografía física. México, D.F.

Dunlop, D.J., Özdemir, Ö., 1997. Rock Magnetism - Fundamentals and Frontiers. Cambridge University Press, Cambridge.

Eisler, R., 2010. Compendium of trace metals and marine biota. Elsevier, Amsterdam.

Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2010. ArcGIS Desktop, ver. 10.0. Environmental Systems Research Institute, Inc, Redlands, USA.

EPA, U.S.E.P.A., 2007. Method 3051A: Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils. Wastes, Hazardous Waste, Test Methods, SW-846. 3000 Series Methods.

European Commission, 2003. Heavy metals in the context of EU policies on soil and waste. Enviroment. URL http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/heavy_metals.htm

Evans, M., Heller, F., 2003. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics. Academic Press.

Fragoso, M., 2013. Propiedades magnéticas y concentración de metales pesados en playas de anidación de Tortuga negra (*Chelonia agassizii*) en Michoacán (Licenciatura). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich. México.

García, B., F., 2009. Fundamentos de Geoestadística.

García, E., 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México, D.F.

González, M.F., 1981. Guías Botánicas de excursiones en México VIII. Excursión a Michoacán y Colima., Congreso Mexicano de Botánica. ed. Biología, U.M.S.N.H., Morelia, Michoacán.

Harrison, R.M., Deacon, A.R., Jones, M.R., Appleby, R.S., 1997. Sources and processes affecting concentrations of PM10 and PM2.5 particulate matter in Birmingham (U.K.). Atmos. Environ. 31, 4103–4117.

Hrouda, F., 1994. A technique for the measurement of thermal changes of magnetic susceptibility of weakly magnetic rocks by the CS-2 apparatus and KLY-2 Kappabridge. Geophys. J. Int. 118 604–612.

Hunt, A., Jones, J., Oldfield, F., 1984. Magnetic measurements and heavy metals in atmospheric particulates of anthropogenic origin. *Sci. Total Environ.* 33, 129–139.

INEGI, 2012. *Perspectiva estadística, Michoacán de Ocampo.*

Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., 1990. *An Introduction to Applied Geostatistics.* Oxford University Press, USA.

IUSS Working Group WRB, 2006. *World Reference Base for Soil Resources 2006., World Soil Resources Reports 103.* ed. FAO, Roma.

Jeleńska, M., Gopsoł, J., Kopceł, B., Sukhorada, J., Tyamina, K., Kadziako-Hofmokr, M., Matviishina, Z., 2004. Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine. *Geophys. J. Int.* 159, 104–116.

Jordanova, D., Hoffmann, V., Fehr, K.T., 2004. Mineral magnetic characterization of anthropogenic magnetic phases in the Danube river sediments (Bulgarian part). *Earth Planet. Sci. Lett.* 221, 71–89.

Jordanova, N.V., Jordanova, D.V., Veneva, L., Yorova, K., Petrovsky, E., 2003. Magnetic response of soils and vegetation to heavy metal pollution - A case study. *Environ. Sci. Technol.* 37, 4417–4424.

Journel, A.G., Huijbregts, C.J., 1978. *Mining geostatistics.* Academic Press, London.

Kapička, A., Jordanova, N., Petrovský, E., Ustjak, S., 2000. Magnetic stability of power-plant fly ash in different soil solutions. *Phys. Chem. Earth Part Solid Earth Geod.* 25, 431–436.

Lecoanet, H., Léveque, F., Ambrosi, J.-P., 2003. Combination of magnetic parameters: an efficient way to discriminate soil-contamination sources (south France). *Environ. Pollut.* 122, 229–234.

- Lu, S.G., Bai, S.Q., 2006. Study on the correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou City, China. *J. Appl. Geophys.* 60, 1–12.
- Matheron, G., 1962. *Traité de Géostatistique*. Bureau de Recherche et Minieres. ed. Technip, París.
- Moreno, L., J. L., 2009. *Introducción a la Geoestadística y su Aplicación*. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Morin, F.J., 1950. Magnetic Susceptibility of $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ and $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ with Added Titanium. *Phys. Rev.* 78, 819–820. doi:10.1103/PhysRev.78.819.2
- Morris, W.A., Versteeg, J.K., Bryant, D.W., Legzdins, A.E., McCarry, B.E., Marvin, C.H., 1995. Preliminary comparisons between mutagenicity and magnetic susceptibility of respirable airborne particulate. *Atmos. Environ.* 29, 3441–3450.
- Mortimer, J.A., 1995. Factors Influencing Beach Selection by Nesting Sea Turtles, in: Bjorndal, K.A. (Ed.), *Biology and Conservation of Sea Turtles: Revised Edition*. Smithsonian Institution Press, Washington, DC, pp. 45–51.
- Organización Mundial de la Salud (OMS), 2011. *Calidad del aire y salud*. Nota descriptiva N° 313.
- Petrovský, E., Ellwood, B.B., 1999. Magnetic monitoring of air-, land- and water-pollution. In: Maher B. A. and Thompson R. (Eds.), *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Petrovský, E., Ellwood, B.B., 1999. Magnetic monitoring of air- land- and water-pollution, in: *Quaternary Climates%2C Environments and Magnetism*. Cambridge University Press.
- PNUMA, 2003. *GEO América Latina y el Caribe. Perspectivas del Medio Ambiente 2003*. Costa Rica.

- Riojas-Rodríguez, H., Schilman, A., López-Carrillo, L., Finkelman, J., 2013. La salud ambiental en México: situación actual y perspectivas futuras. *Salud Pública México* 55, 638–649.
- Rzedowski, J., 1988. *Vegetación de México*. Limusa, S.A. de C.V.
- SCT, 2006. Programa maestro de desarrollo. Puerto de Lázaro Cárdenas 2006-2011. Versión alineada con PRODELI y BSC. Lázaro Cárdenas, Michoacán.
- SEMARNAP, 2000. Promoción de la prevención y reducción de riesgos químicos ambientales, Primera. ed. INE, México, D.F.
- SEMARNAT, 2013. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT, 2010. Manifestación de Impacto Ambiental, Modalidad Regional para el desarrollo de infraestructura portuaria de APILAC, S.G.P.A./DGIRA.DG.4195.10.
- SEMARNAT, INECC, 2011. Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009), Primera. ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático., México D.F.
- Storelli, M.M., Marcotrigiano, G.O., 2003. Heavy metal residues in tissues of marine turtles. *Mar. Pollut. Bull.* 46, 397–400.
- Tauxe, L., Butler, R.F., Voo, R.V. der, Banerjee, S.K., 2010. *Essentials of Paleomagnetism*. University of California Press, Berkeley.
- Thompson, R., Oldfield, F., 1986. *Environmental magnetism*. Allen and Unwin, London 227.
- Ulrich, A., Wichser, A., Hess, A., Heeb, N., Emmenegger, L., Czerwinski, J., Kasper, M., Mooney, J., Mayer, A., 2012. Particle and Metal Emissions of Diesel and

Gasoline Engines—Are Particle Filters Appropriate Measures?, in: 16th Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich, Switzerland, June. pp. 24–27.

Verwey, E.J.W., 1939. Electronic Conduction of Magnetite (Fe_3O_4) and its Transition Point at Low Temperatures: Abstract: Nature. Nature 144.

Wong-González, P., 2009. Ordenamiento ecológico y ordenamiento territorial: retos para la gestión del desarrollo regional sustentable en el siglo XXI. *Estud. Soc. Hermosillo* Son 17, 11–39.

Xie, S., Dearing, J.A., Boyle, J.F., Bloemendal, J., Morse, A.P., 2001. Association between magnetic properties and element concentrations of Liverpool street dust and its implications. *J. Appl. Geophys., Rock Magnetism in Environmental Pollution Studies* 48, 83–92.

Yang, T., Liu, Q., Chan, L., Liu, Z., 2007. Magnetic signature of heavy metals pollution of sediments: case study from the East Lake in Wuhan, China. *Environ. Geol.* 52, 1639–1650.

Zhang, W., Yu, L., Lu, M., Hutchinson, S.M., Feng, H., 2007. Magnetic approach to normalizing heavy metal concentrations for particle size effects in intertidal sediments in the Yangtze Estuary, China. *Environ. Pollut.* 147, 238–244.

Zhou, S., Yuan, Q., Li, W., Lu, Y., Zhang, Y., Wang, W., 2014. Trace metals in atmospheric fine particles in one industrial urban city: Spatial variations, sources, and health implications. *J. Environ. Sci.* 26, 205–213. doi:10.1016/S1001-0742(13)60399-X