



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPIEDADES MAGNÉTICAS Y SUS RELACIONES CON  
METALES PESADOS Y ELEMENTOS MAYORES EN SUELOS  
SUPERFICIALES DEL VALLE DE MÉXICO**

**T E S I S**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO GEOFÍSICO**

P R E S E N T A:

**ERICK EDUARDO MARTINEZ PICHARDO**

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ANA MARÍA SOLER ARECHALDE



CIUDAD UNIVERSITARIA. MÉXICO D. F. 2009



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
60-I-1449

**SR. ERICK EDUARDO MARTÍNEZ PICHARDO**  
**Presente**

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Dra. Ana María Soler Arechalde y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**PROPIEDADES MAGNÉTICAS Y SUS RELACIONES CON METALES PESADOS Y  
ELEMENTOS MAYORES EN SUELOS SUPERFICIALES DEL VALLE DE MÉXICO**

**RESUMEN**  
**I INTRODUCCIÓN**  
**II BASES TEÓRICAS**  
**III ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA**  
**IV ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS**  
**VI CONCLUSIONES**  
**BIBLIOGRAFÍA**  
**ANEXOS**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cd. Universitaria, D. F., a 29 de noviembre de 2007  
EL DIRECTOR

**MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA**

RJPYS\*tjh

Agradecimientos.

Doy gracias a mi familia por permitirme haber estudiado una licenciatura, a mis padres por el sustento y el apoyo a lo largo de mi vida y a mis hermanos por darme su cariño.

A Tania por permitirme haber sido parte de un capítulo de su vida.

A la Dra. Ana Maria Soler por la oportunidad de compartir con ella este proyecto y también por su amistad. Así como también, al Departamento de Geomagnetismo del Instituto de Geofísica, por las facilidades de su laboratorio y el apoyo a lo largo de este trabajo.

A la Dra Ofelia Morton y el equipo del LUGIS, por realizar y compartir los resultados de los análisis utilizados en esta tesis. A Rufino por realizar los estudios de fluorescencia de Rayos X de las muestras.

A mi Facultad de Ingeniería por formarme como ingeniero y a la UNAM por permitirme a mí y a miles de estudiantes acceder a una educación de gran nivel académico.

Gracias

**Índice**

Resumen	1
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>2</b>
Introducción	2
Objetivos	3
<b>Capítulo 2. Bases Teóricas</b>	<b>4</b>
2.1 Campo Magnético	4
2.2 Momento magnético	5
2.3 Magnetización	5
2.4 Inducción magnética	6
2.5 Magnetización y susceptibilidad magnética	8
2.6 Relación entre B y H	8
2.7 Campo magnético terrestre	9
2.8 Origen del campo magnético	11
2.9 Magnetismo a nivel atómico	11
2.10 Propiedades magnéticas de la materia	14
2.11 Dominios Magnéticos	16
2.12 Minerales magnéticos	17
<b>Capítulo 3. Área de Estudio y Metodología</b>	<b>19</b>
Área de estudio	19
3.1 Distrito Federal y Municipios conurbados	19
Metodología	21
3.2 Trabajo de campo	21
3.3 Trabajo de Laboratorio	21
3.4 Estudios magnéticos	21
3.5 Estudios químicos	26
<b>Capítulo 4. Análisis de Datos y Resultados</b>	<b>27</b>
Análisis de Datos	27
4.1 Susceptibilidad Magnética	27
4.2 Magnetización remanente natural NRM	
4.3 Magnetización remanente anhistórica MRA	28
4.4 Magnetización remanente isotérmica MRI	28
4.5 Susceptibilidad vs Temperatura	28
4.6 Histéresis Magnética	28
4.7 Metales Pesados	30

Resultados	34
<b>Capítulo 5. Conclusiones</b>	<b>54</b>
Conclusiones	54
Bibliografía	57
Anexos	61

**Resumen**

La aplicación de los estudios de propiedades magnéticas de rocas en suelos urbanos permite obtener relaciones útiles para la determinación de zonas contaminadas por metales pesados y elementos mayores. Estos estudios se basan en que las partículas o cenizas emitidas por diferentes fuentes antropogénicas contienen materiales ferromagnéticos (antiferromagnéticos y ferrimagnéticos) y además, contienen o pueden adoptar en su estructura cristalina metales pesados.

El área de estudio comprendió el Distrito Federal y área metropolitana, obteniéndose 142 muestras de mano en un área de  $140\text{km}^2$ .

Los experimentos magnéticos realizados en el presente trabajos fueron: susceptibilidad magnética, magnetización remanente natural, magnetización remanente anhistéica, magnetización remanente isotérmica, histéresis magnética y variación de la susceptibilidad magnética con la temperatura. De las mismas muestras se realizaron estudios químicos cuyos resultados nos fueron facilitados. Análisis estadístico fue empleado para obtener las correlaciones entre parámetros magnéticos y la composición química. Los resultados obtenidos corroboraron la utilidad del método de propiedades magnéticas como una herramienta para monitoreo de contaminación.

## Capítulo 1. Introducción

El magnetismo ambiental investiga las propiedades magnéticas de los materiales los cuales se formaron bajo la influencia de procesos ambientales. Analiza el comportamiento magnético y el estado de contaminación de suelos, lagos, ríos y arroyos utilizando diferentes técnicas y parámetros magnéticos. Es un campo que se ha desarrollado debido a las nuevas técnicas, mediciones e interpretación de los parámetros magnéticos en estudios ambientales. Por lo tanto, ofrece una herramienta para analizar problemas relacionados con cambios ambientales y climáticos.

Las propiedades magnéticas de las rocas, suelos, sedimentos y partículas atmosféricas, ofrecen una gran información para varias disciplinas. Los análisis magnéticos son más rápidos, económicos y permiten procesar un gran número de muestras en comparación con los métodos convencionales de análisis ambiental, por ejemplo los análisis químicos. Las mediciones magnéticas son rápidas, simples y no destructivas y se aplican a problemas de geofísica, meteorología, climatología, hidrología, limnología, oceanografía, sedimentología, edafología, ecología, geomorfología, y estudios de uso de tierra (Thompson y Oldfield, 1986).

Las mediciones magnéticas permiten describir las características magnéticas de los principales portadores presentes en suelos. La concentración de minerales magnéticos en una muestra puede ser estimada a través de la susceptibilidad magnética, mientras que la relación entre varios parámetros magnéticos provee información acerca de los tipos de granos magnéticos y su tamaño. Esta información ayuda a identificar presencia de contaminantes (Hanesch y Scholger, 2002; Chaparro *et al*, 2003; Xue y Yong, 2006 ; Hoffmann *et al*, 1999). También se han usado para reconstruir paleoclimas, procesos de formación de suelo, identificar fuentes de sedimentos y como índice de erosión.

La Tierra presenta ecosistemas dinámicos que pueden absorber factores perjudiciales. La contaminación aérea es uno de los factores que más afectan a los ecosistemas terrestres. Las partículas contaminantes atmosféricas, especialmente los contaminantes primarios, como son los introducidos a la troposfera por procesos naturales o antropogénicos, pueden incluir metales pesados u otros elementos. El término metales pesados, traza o metales tóxicos, es empleado para distinguir un grupo de elementos de importancia industrial y biológica, con densidades mayores a  $6 \frac{g}{cm^3}$ . Las partículas contaminantes son dispersadas globalmente por la circulación atmosférica convirtiéndose en componentes importantes en suelos, sedimentos y la hidrosfera. Por, lo tanto, estos contaminantes son



transferidos a la superficie de la Tierra, su deposición y distribución dependen en gran medida de las condiciones meteorológicas, como la dirección y velocidad del viento (Petrovsky y Ellwood, 1999).

Los suelos urbanos son recipientes de una gran cantidad de metales pesados, las fuentes de estos, pueden ser, emisiones de vehículos, desechos industriales y otras actividades humanas. Las cenizas industriales contienen una importante fracción de partículas ferromagnéticas, pero son los procesos de la combustión de combustibles fósiles una de las fuentes más importantes de estas partículas.

Los granos magnéticos, predominantemente óxidos y sulfuros de hierro, se encuentran en suelos, sedimentos, cenizas y organismos, en mayor o menor concentración. Y son muy sensibles para registrar cambios en el ambiente y clima. La mineralogía, concentración, tamaño de grano magnético y morfología de granos magnéticos pueden variar de acuerdo con el origen y posterior deposición sedimentaria. Tales variaciones dan como resultado cambios en las propiedades magnéticas de los materiales, estos cambios pueden ser registrados por instrumentos que miden las propiedades magnéticas de la materia.

Es importante señalar que los instrumentos empleados para medir las propiedades magnéticas son capaces de registrar los portadores magnéticos que en la mayoría de los casos su concentración es menor al 1%.

## **Objetivos**

Determinar la composición de las muestras de suelos para detectar anomalías químicas asociadas a contaminación ambiental.

Determinar las propiedades magnéticas de las muestras de suelos.

Establecer correlaciones entre la composición química y las propiedades magnéticas para establecer patrones de comportamiento atribuibles a contaminación ambiental.

Usar correlaciones y análisis de factores para establecer factores generales para la aplicación de las propiedades magnéticas en estudios de contaminación de suelos, dada la mayor rapidez del análisis de muestras y menor costo.

## Capítulo 2. Bases Teóricas

El magnetismo fue estudiado por los chinos hace más de 4500 años. Pero fueron los griegos los que registraron las primeras observaciones de los fenómenos eléctricos. Aunque el conocimiento de fenómenos eléctricos es antiguo, la comprensión de este fenómeno se obtuvo hasta el siglo XVI, pero los mayores experimentos y estudios fueron realizados en el siglo XIX. En el año de 1819 ya se conocía el comportamiento cualitativo entre polos magnéticos (extremos de un imán), polos del mismo tipo se rechazan y polos de diferente tipo se atraen. En ese mismo año, Hans Christian Oersted (1777-1851) realizó observaciones en las brújulas cuando se acercaban a un conductor con corriente eléctrica. Llegó a la conclusión, que la corriente eléctrica debía producir un campo magnético que superpuesto al terrestre daba por resultado una nueva orientación de las brújulas. Con tal experimento se empieza a relacionar los dos fenómenos: el eléctrico y el magnético.

### 2.1 Campo Magnético

El campo magnético está definido por sus efectos y no por sus causas. Un campo magnético es generado por corrientes eléctricas (movimiento de cargas). Si se hace circular una corriente eléctrica  $i$  por un alambre, se producirá un campo magnético  $\mathbf{H}$  alrededor de este, un círculo perpendicular al campo representa las líneas de inducción, también ilustra la regla de la mano derecha si se coloca el pulgar en dirección de la corriente eléctrica, los dedos restantes indicaran la dirección del campo  $\mathbf{H}$  (Figura 2.1).

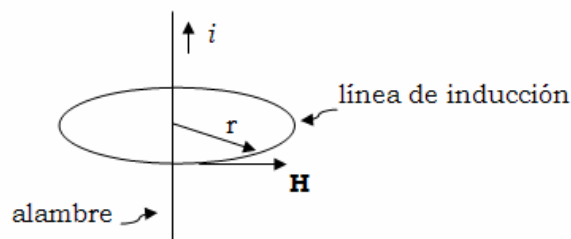


Figura 2.1. Campo magnético producido por un alambre con intensidad de corriente  $i$  (Modificado de Butler, 2004).

La intensidad del campo magnético  $\mathbf{H}$  es proporcional a la intensidad de corriente  $i$ . Para el caso de la figura 2.1 la intensidad del campo magnético  $\mathbf{H}$  está dada por la ley de Ampere:

$$H = \frac{i}{2\pi r}$$

Las unidades de  $H$  son: A/m

## 2.2 Momento magnético

El momento magnético  $\mathbf{M}$  se puede definir de varias formas, como un par de cargas magnéticas o como una espira (loop) de corriente eléctrica. Si se tienen dos cargas magnéticas de magnitud  $m$ , separadas a una distancia  $l$  (Figura 2.2), el momento magnético  $\mathbf{M}$  está dado por:

$$\mathbf{M} = m l$$

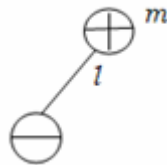


Figura 2.2. Momento magnético entre dos cargas en movimiento

Para el caso de una espira (loop) de corriente eléctrica  $i$ , con área  $A$ , el momento magnético  $\mathbf{M}$  está dado por:

$$\mathbf{M} = i A n$$

donde  $n$  es el vector unitario perpendicular al plano del círculo (Figura 2.3).

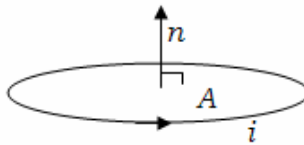


Figura 2.3. Momento magnético para un círculo o espira (loop) con intensidad de corriente  $i$  (Modificado de Butler, 2004).

## 2.3 Magnetización

La intensidad magnética o magnetización  $\mathbf{J}$ , de un material está dada por la suma de los momentos magnéticos dipolares por unidad de volumen:

$$J = \frac{\sum_i M_i}{\text{volumen}}$$

Existen dos tipos de magnetización: magnetización inducida y magnetización remanente. Cuando un material está expuesto a un campo magnético  $\mathbf{H}$ , este material adquirirá una magnetización inducida  $\mathbf{J}_i$ ; la magnetización remanente  $\mathbf{J}_r$ , es la que permanece después de haber retirado el campo y es el registro de la dirección del campo geomagnético en el tiempo de formación de la roca (Butler, 2004).

## 2.4 Inducción magnética

El campo magnético es un vector porque en cualquier lugar del campo presenta dirección y sentido. Si se considera una barra magnética como en la figura 2.4, las líneas de inducción indican la dirección del campo y la intensidad dependen de que tan cerca estén las líneas unas con otras. Estas líneas de inducción se llaman flujo magnético, salen del polo norte de la barra y entra en el polo sur (Figura 2.4). La densidad de las líneas es una medida de la intensidad del campo magnético. La inducción magnética es el vector que caracteriza esta densidad de flujo magnético.

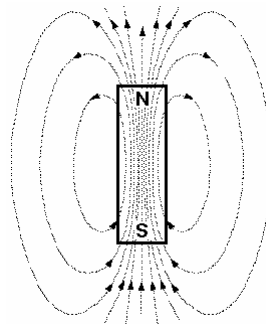


Fig 2.4. Dipolo magnético Web 1.

La inducción magnética  $\mathbf{B}$  se puede definir de varias formas. Si se coloca una carga eléctrica  $q$ , con una velocidad  $\mathbf{v}$ , dentro de un campo eléctrico (Figura 2.5).

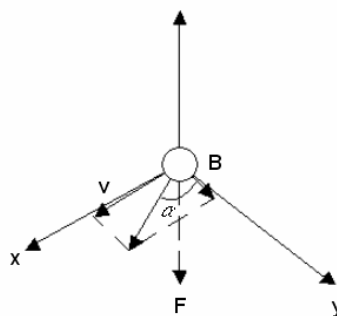


Figura 2.5. Relación vectorial entre  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{B}$ . Los vectores  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{B}$  se encuentran en el plano  $xy$ .

La fuerza magnética que experimentará dicha carga será:

$$F_m = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

que se conoce como fuerza de Lorentz.

También se puede expresar como:

$$|F_m| = q |\mathbf{v}| |\mathbf{B}| \sin \alpha$$

$$F_m = q v B \sin \alpha$$

Las unidades de B son:

$$[B]_u = \frac{V \cdot s}{m^2} = \frac{Wb}{m^2} = T$$

Según las ecuaciones de Maxwell, que dependen del tiempo y la posición, la ley de Ampere generalizada se expresa como:

$$\nabla \times \mathbf{H}(r,t) = \mathbf{J}(r,t) + \frac{\partial \mathbf{D}(r,t)}{\partial t}$$

y la ley de Gauss para el campo magnético como:

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(r,t) = 0$$

Donde H: es la intensidad del campo magnético (A/m)

J: es la densidad de corriente (A/m<sup>2</sup>)

D: es el vector de desplazamiento eléctrico (C/m<sup>2</sup>)

B: es el vector de inducción magnética (T)

La ley de Ampere indica que los campos magnéticos son generados por el flujo de corrientes eléctricas, en un medio continuo. La ley de Gauss para magnetismo indica que no existe el monopolo magnético, un campo magnético siempre tendrá dos polos (un polo positivo y un polo negativo).

## 2.5 Magnetización y susceptibilidad magnética

La relación entre magnetización inducida  $\mathbf{J}_i$  en un material y el campo magnético  $\mathbf{H}$ , está dada por:

$$\mathbf{J}_i = \chi_m \mathbf{H}$$

El parámetro  $\chi_m$  se le conoce como susceptibilidad magnética, y es el grado de magnetización de un material en respuesta a la presencia de un campo magnético. Es adimensional debido a que  $\mathbf{J}_i$  y  $\mathbf{H}$  tienen las mismas unidades. La expresión anterior indica que  $\mathbf{J}_i$  es paralela a  $\mathbf{H}$ , por lo tanto existe isotropía. Pero algunos materiales presentan anisotropía, cuando  $\mathbf{J}_i$  no es paralela a  $\mathbf{H}$ , esto es cuando un campo aplicado en una dirección produce magnetización no sólo en la dirección aplicada al campo sino también en otras direcciones, para este caso la susceptibilidad magnética se expresa como un tensor de 3x3, los eigenvalores y eigenvectores de este tensor proporcionan las magnitudes y direcciones de los ejes principales de la susceptibilidad magnética  $\chi_1, \chi_2, \chi_3$ .

## 2.6 Relación entre B y H

La relación entre la inducción magnética B y la intensidad del campo magnético H está dada por:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad \text{en SI}$$

$$B = \mu_0 H + 4\pi J \quad \text{en CGS}$$

La Tabla 2.1 muestra las unidades y conversiones en ambos sistemas.

Tabla 2.1. Unidades y conversión entre los sistemas SI y CGS

Parámetro	S.I	CGS	Conversión
Momento magnético M	Am <sup>2</sup>	emu	1 Am <sup>2</sup> = 10 <sup>3</sup> emu
Magnetización J	Am <sup>-1</sup>	emu cm <sup>3</sup>	1 Am <sup>-1</sup> = 10 <sup>-3</sup> emu cm <sup>3</sup>
Campo Magnético H	Am <sup>-1</sup>	Oersted (oe)	1 Am <sup>-1</sup> = 4 π x 10 <sup>-3</sup> oe
Inducción Magnética B	T	Gauss (G)	1 T = 10 <sup>4</sup> G
Permeabilidad magnética μ <sub>0</sub>	Hm <sup>-1</sup>	1	4π x 10 <sup>-7</sup> Hm <sup>-1</sup> = 1
Susceptibilidad total χ (M/H)	m <sup>3</sup>	emu oe <sup>-1</sup>	1 m <sup>3</sup> = 10 <sup>6</sup> /4π emu oe <sup>-1</sup>
Susceptibilidad volumétrica J/H	–	emu cm <sup>-3</sup> oe <sup>-1</sup>	1 S.I. = 1/4π emu cm <sup>-3</sup> oe <sup>-1</sup>
Susceptibilidad por masa (M/m <sup>3</sup> 1/H)	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	emu g <sup>-1</sup> oe <sup>-1</sup>	1 m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> = 10 <sup>3</sup> /4π emu g <sup>-1</sup> oe <sup>-1</sup>

## 2.7 Campo magnético terrestre

William Gilbert en 1600 fue el primero en describir el campo geomagnético como un dipolo. Gellibrand en 1635 demostró que el campo geomagnético varía tanto regionalmente como temporalmente. Gauss en 1839 desarrolló un método matemático para analizar el campo geomagnético en términos del potencial y representándolo como series infinitas de funciones armónicas esféricas (Thompson *et al*, 1986).

Se puede describir el campo geomagnético en la superficie terrestre como un vector con tres componentes: declinación  $D$ , inclinación  $I$  e intensidad  $H$ . En paleomagnetismo la dirección del campo geomagnético se representa de acuerdo a la figura 2.6, donde la componente vertical,  $H_v$ , se define positiva en dirección del eje  $z$ , y se define como:

$$H_v = H \sin I$$

donde  $H$  es la magnitud de  $\mathbf{H}$ .

La componente horizontal  $H_h$ , está dada por:

$$H_h = H \cos I$$

Las componentes norte,  $H_N$ , y este,  $H_E$ , geográficos:

$$H_N = H \cos I \cos D$$

$$H_E = H \cos I \sin D$$

La declinación  $D$ , es el ángulo que forma el norte geográfico con la componente horizontal. La inclinación  $I$ , es el ángulo que forma el campo geomagnético  $\mathbf{H}$  y la componente horizontal.

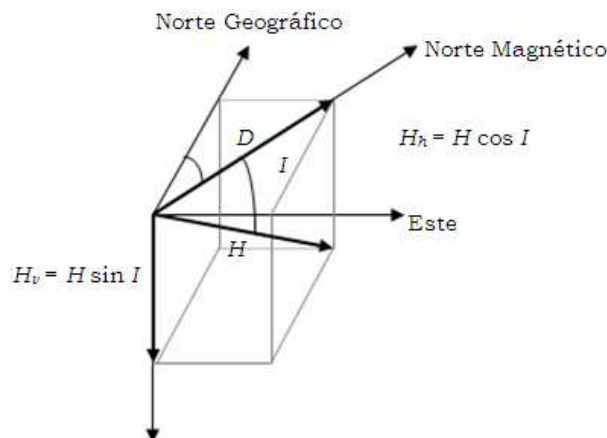


Fig 2.6. Dirección del campo magnético (Modificado de Butler, 2004).

El campo magnético terrestre, se puede modelar como un campo dipolar, geocéntrico y axial, (Figura 2.7). El dipolo magnético es colocado en el centro de la tierra y alineado con el eje de rotación, la latitud geográfica es  $\lambda$ , el radio terrestre es  $r_e$ , el polo norte geográfico es N, la dirección del campo en la superficie de la Tierra producido por el dipolo es H y la declinación I se muestra para ese punto (Figura 2.7).

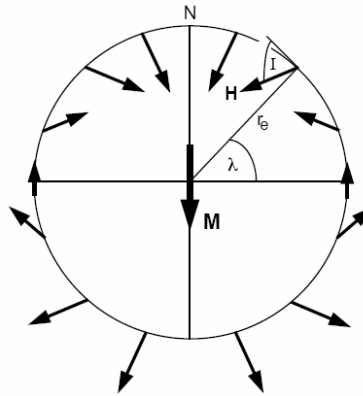


Figura 2.7. Modelo dipolar geocéntrico axial (Modificado de Butler, 2004).

El modelo que representa el campo magnético actual, el campo dipolar, geocéntrico, inclinado, la inclinación es  $\sim 11.5^\circ$  con respecto del eje de rotación. Los polos de este modelo son los polos geomagnéticos, y son la intersección del dipolo inclinado con la superficie de la Tierra, (Figura 2.8).

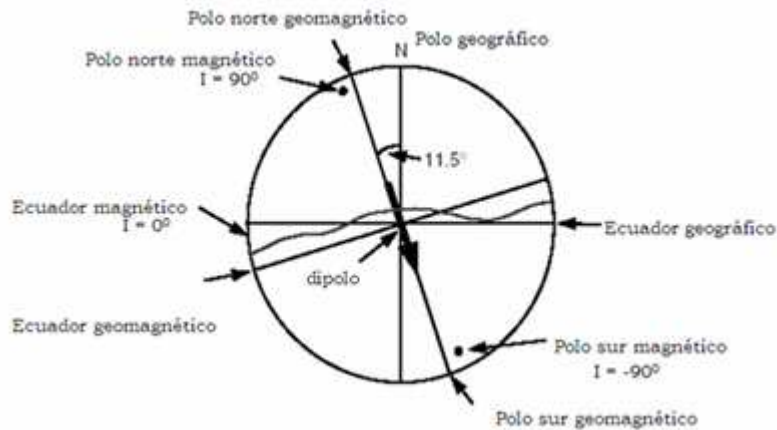


Figura 2.8. Modelo del dipolo geocéntrico inclinado (Modificado de Butler, 2004).



## 2.8 Origen del campo magnético.

El modelo físico para representar el campo magnético terrestre, es el dinamo de Lamor. El modelo consiste en un disco de cobre que gira sobre un eje, el movimiento del disco genera un campo magnético perpendicular al disco. También el movimiento va a provocar que sobre los electrones se experimente la fuerza de Lorentz, esta fuerza provoca que los electrones se muevan hacia la periferia del disco, provocando una corriente eléctrica. Colocando una bobina (la cual alimentará al campo principal) unida a la periferia del disco y uniéndola al eje de rotación del disco de cobre se cerrará el circuito (Figura 2.9).

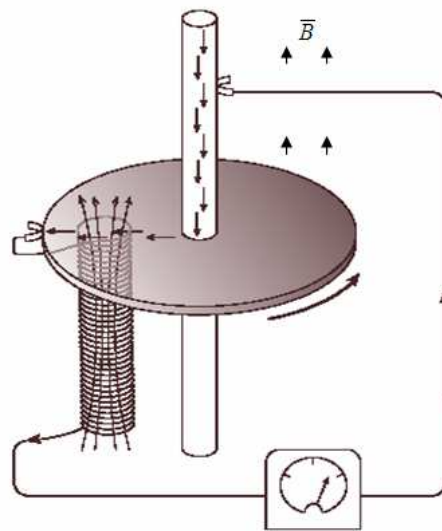


Figura 2.9. Modelo del dinamo retroalimentado (Tomado de Butler, 2004).

Este modelo no explica las inversiones del campo geomagnético, para producir una inversión en este modelo el giro del disco debería ser en sentido contrario. El modelo de Rikitake propone dos discos unidos girando en el mismo sentido, este modelo genera inversiones como las que representa el campo magnético terrestre. El campo geomagnético es generado por las corrientes de convección en el núcleo externo de la Tierra, el cual está compuesto en mayor cantidad de hierro, níquel y algunos otros compuestos.

## 2.9 Magnetismo a nivel atómico.

El campo magnético es generado por corrientes eléctricas. A nivel atómico el campo magnético es generado por el movimiento de los electrones, existe un movimiento de electrones alrededor del átomo y un movimiento del mismo electrón sobre su propio eje (espín), estos dos movimientos generan el campo magnético (Figura 2.10).

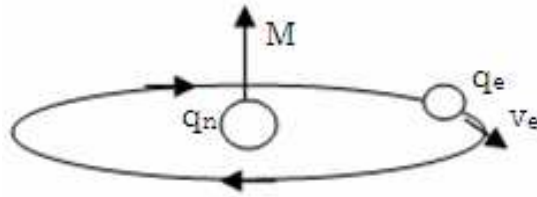


Figura 2.10. Movimiento orbital del electrón con carga  $q_e$  y velocidad  $v_e$  alrededor del núcleo con carga  $q_n$ , genera un momento magnético  $M$  (Tomado de Bluter, 2004).

Para describir la estructura electrónica del átomo se emplea la mecánica cuántica, que utiliza cuatro números cuánticos  $n$ ,  $l$ ,  $m$ ,  $s$ . El estado de energía del orbital está dado por  $n$ . La forma está dada por  $l$  y la orientación por  $m$ , y el espín por  $s$  y puede tener el valor de  $\frac{1}{2}$  y  $-\frac{1}{2}$  según la dirección de giro del electrón.

Los orbitales electrónicos son llenados de acuerdo a tres reglas:

- 1) Principio de exclusión de Pauli, dos electrones en un átomo no pueden tener los mismos números cuánticos.
- 2) Los orbitales son llenados conforme se incrementa la energía.
- 3) Regla de Hund, la distribución más estable de electrones en los subniveles es aquella que tenga el mayor número de espines paralelos

Los elementos con más espines desapareados son los elementos de transición y son los responsables del comportamiento paramagnético en las rocas (Figura 2.11) (Tauxe, Web 4).

	n=0	n=1	n=2					n=3
Elemento			3s	3p			3d	4s
Na			↑					
Mg			↑ ↓	x	y	z		
Al								
Si				↑				
P				↑	↑			
S				↑	↑	↑		
Cl				↑ ↓	↑	↑		
Ar				↑ ↓	↑ ↓	↑		
K	1s <sup>2</sup>	2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>		↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	xy xz yz x <sup>2</sup> -y <sup>2</sup> z <sup>2</sup>	↑
Ca								↑ ↓
Sc							↑	↑ ↓
Ti			3s <sup>2</sup>				↑ ↑	↑ ↓
V							↑ ↑ ↑	↑ ↓
Cr							↑ ↑ ↑ ↑	↑ ↓
Mn							↑ ↑ ↑ ↑ ↑	↑ ↓
Fe				3p <sup>6</sup>			↑ ↓ ↑ ↑ ↑	↑ ↓
Co							↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↑ ↑	↑ ↓
Ni							↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↑	↑ ↓
Cu							↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑	↑ ↓
Zn							↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓	↑ ↓

Figura 2.11. Estructura atómica de los elemento.

Los momentos magnéticos generados por los electrones crean magnetización inducida que es observable en el exterior de la sustancia.

## 2.10 Propiedades magnéticas de la materia.

Existen varios tipos de propiedades magnéticas observadas en la materia: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo y antiferromagnetismo.

### Diamagnetismo.

El diamagnetismo resulta de la interacción de un campo aplicado con el movimiento de los electrones y el resultado es una magnetización negativa muy débil. La aplicación del campo magnético altera el movimiento orbital de los electrones y produce una pequeña magnetización antiparalela a la dirección del campo aplicado. La susceptibilidad magnética para materiales diamagnéticos es negativa e independiente de la temperatura (Figura 2.12.a). Algunos minerales como el cuarzo, feldespatos, calcita, presentan un comportamiento diamagnético (Thompson y Oldfield, 1986).

### Paramagnetismo.

El paramagnetismo ocurre cuando los átomos individuales, iones y moléculas presentan un momento dipolar permanente. Este momento dipolar tiende a alinearse paralelamente a cualquier campo aplicado y causa una magnetización positiva débil. Cuando el campo es aplicado a una sustancia paramagnética los momentos magnéticos del espín tienden a ordenarse paralelamente en la dirección del campo aplicado, (Figura 2.12.b), esta magnetización se pierde al dejar de actuar el campo. Algunos minerales como el olivino, piroxeno, granate, biotita y carbonatos de hierro y magnesio presentan un comportamiento paramagnético (Thompson y Oldfield, 1986).

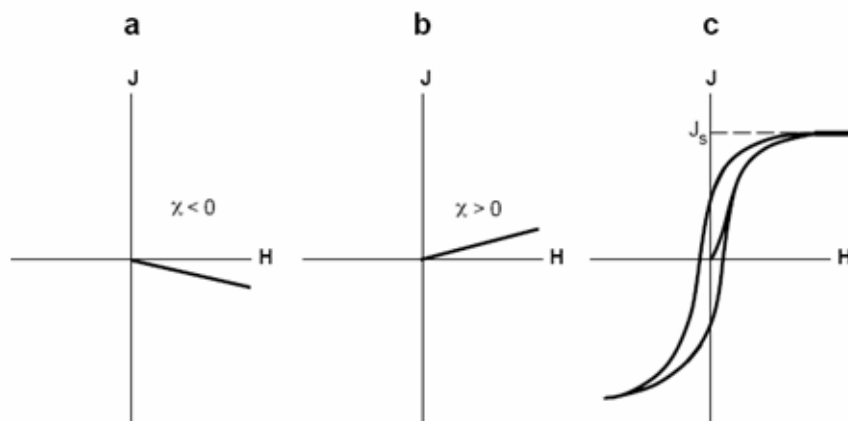


Figura 2.12. Gráficas de magnetización vs campo aplicado para sustancias a) diamagnéticas, b) paramagnéticas, c) ferromagnéticas. (Tomado de Butler, 2004).

Ferromagnetismo.

El fenómeno ocurre cuando interactúan todos los momentos magnéticos elementales (asociados al espín del electrón) alineándose paralelamente unos con otros (Figura 2.12.c). Esto puede ocurrir incluso en ausencia de un campo magnético. Materiales ferromagnéticos como el hierro son caracterizados por la forma en como cambian sus propiedades magnéticas a una temperatura crítica llamada temperatura de Curie,  $T_c$ . Debajo de la temperatura de Curie,  $T_c$  el material presenta una fuerte magnetización remanente, pero por encima de la temperatura de Curie el ordenamiento ferromagnético se rompe a causa de la agitación térmica y se comporta como un material paramagnético. Para un mineral ferromagnético a una temperatura dada existe un máximo de magnetización, llamada magnetización de saturación  $J_s$  (Figura 2.13.a). Los materiales ferromagnéticos se caracterizan por una susceptibilidad positiva y grande, Tabla 2.1 (Thompson, 1986, Butler, 2004)

Tabla 2.1

Nombre	Susceptibilidad	Permeabilidad
Paramagnéticas	$0 < \chi_m \ll 1$	$\mu > \mu_0$
Diamagnéticas	$\chi_m < 0$ y $\chi_m \ll 1$	$\mu < \mu_0$
Ferromagnéticas	$\chi_m > 0$ y $\chi_m \rightarrow \infty$	$\mu \gg \mu_0$

Los ferromagnéticos exhiben la propiedad llamada histéresis, en presencia de un campo magnético  $H$  el material ferromagnético adquiere una magnetización de saturación  $J_s$ , al disminuir en campo  $H$  la curva de magnetización es diferente a la curva cuando se incrementaba el campo  $H$ , al desaparecer el campo  $H=0$  permanece una magnetización residual en el material.

Ferrimagnetismo.

El ferrimagnetismo es muy similar al ferromagnetismo, debajo de la temperatura de la temperatura de Curie presenta una magnetización remanente y por encima de ella presenta un comportamiento paramagnético. El comportamiento ferrimagnético depende en particular de su estructura cristalina. La alineación de los momentos magnéticos es antiparalela y de diferente magnitud, por lo tanto retienen una magnetización débil al cesar el campo aplicado (Figura 2.13.b). Un ejemplo de un mineral ferrimagnético es la magnetita.

Antiferromagnetismo.

La alineación de los momentos magnéticos en las sustancias antiferromagnéticas es antiparalela y de igual magnitud produciendo una magnetización resultante nula (Figura 2.13.c). Entre las sustancias antiferromagnéticas se encuentran la hematita, los óxidos de manganeso, de hierro, cobalto y níquel.

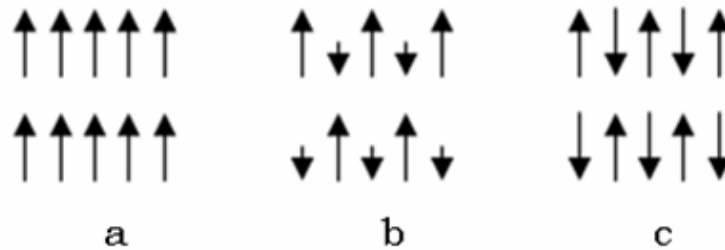


Figura 2.13. Arreglo de los momentos magnéticos para sustancias a) ferromagnéticas, b) ferrimagnéticas, c) antiferromagnéticas.

**2.11 Dominios Magnéticos.**

El concepto de dominios magnéticos fue propuesto por Weiss en 1907. Proponía que el grano magnético estaba dividido en varios dominios o regiones, en los cuales existe un ordenamiento de los momentos magnéticos en una dirección, provocando una magnetización predominante, (Figura 2.3). La suma de estos dominios magnetizados puede ser cero. Posteriormente Bloch en 1930 propuso que los dominios estaban separados por zonas de energía y espesores finitos, a estas zonas se les conoce como paredes de Bloch. En estas paredes los espines de los electrones no apareados cambian continuamente a otro dominio (Figura 2.14).

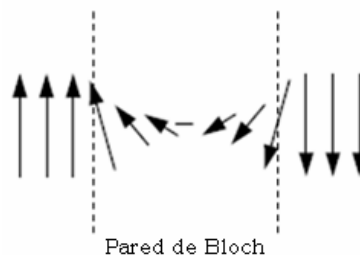


Figura 2.14. Representación de la pared de Bloch (Modificado de Butler, 2004).

Conforme decrece el tamaño de grano disminuye en número de dominios, los granos con un solo dominio se les llama dominio sencillo

(DS), los cambios en la magnetización de este dominio ocurre por la rotación simultánea de los espines; los que contienen más de un dominio se les llama dominio múltiple (DM), (Figura 2.15), 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 (DPS), su magnetización no es uniforme debido a que el tamaño del grano es mayor (Dunlop, 2002)

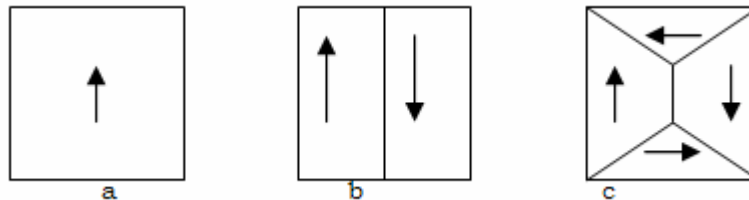


Figura 2.15. a) grano con DS, b) y c) granos con MD.

## 2.12 Minerales magnéticos.

Los principales minerales con propiedades magnéticas son los óxidos de hierro y titanio, pertenecientes al grupo de la espinela, que es una estructura cristalográfica flexible con respecto al número de cationes que puede aceptar. A este grupo pertenecen la magnetita, ulvoespinela, titanomagnetitas, maghemita y las titanomaghemita. Los cuales se representan principalmente en un diagrama ternario  $TiO_2 - FeO - Fe_2O_3$ , el cual indica de izquierda a derecha el incremento en la proporción de  $Fe^{3+}$  a  $Fe^{2+}$  y de abajo hacia arriba indica el incremento en el contenido de titanio, el diagrama también indica dos series de soluciones sólidas, las serie de titanomagnetitas y la serie de titanohematitas (Figura 2.16).

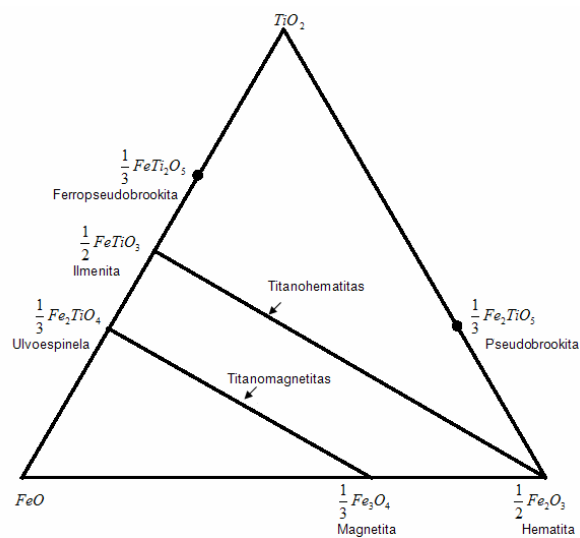


Figura 2.16. Diagrama ternario  $TiO_2 - FeO - Fe_2O_3$  (Modificado de Tauxe, Web4).

### Magnetita

Es uno de los óxidos de hierro más comunes, se encuentra en gran cantidad en las rocas ígneas, y en varias rocas tanto metamórficas como sedimentarias. Presenta la estructura cúbica pero invertida. La magnetita es ferrimagnético y su Tc es a 580°C.

### Ulvoespinela

Tiene la misma estructura cúbica invertida que la magnetita pero con diferente composición. La ulvoespinela es antiferromagnética. La solución sólida entre la magnetita y la ulvoespinela se le conoce como serie de titanomagnetitas y tiene una Tc de 600°C, la Tc de esta serie desciende conforme se incrementa el contenido de titanio.

### Hematita e Ilmenita

Tienen una estructura cristalina romboédrica, la hematita se presenta en las rocas ígneas y en sedimentos formados en condiciones de oxidación, presenta un comportamiento antiferromagnético y su Tc es 680°C. A la serie de solución sólida entre la hematita y la ilmenita se le conoce como titanohematita, la Tc de esta serie decrece conforme se incrementa en contenido de titanio.



### Capítulo 3. Área de Estudio y Metodología

#### Área de estudio

El Área Metropolitana de la Ciudad de México es una de las más grandes del mundo, con cerca de 20 millones de habitantes, abarca  $1500\text{km}^2$  urbanos y en ella transitan casi 3.5 millones de vehículos. La ciudad está rodeada por montañas que dificultan la dispersión de los contaminantes. Se ubica en una altitud elevada (2240 m) y está cerca del ecuador, condiciones que permiten una gran intensidad de la radiación solar, lo que lleva a una rápida formación de ozono y partículas secundarias (Molina y Molina, 2005).

#### 3.1 Distrito Federal y Municipios conurbados.

El Distrito Federal y Municipios conurbados se localizan en la Cuenca de México, que se encuentra ubicada dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, entre  $98^{\circ} 30' - 99^{\circ} 30'$  de longitud oeste y  $19^{\circ} 00' - 20^{\circ} 15'$  de latitud norte. El Eje Neovolcánico es una cadena montañosa constituida por lavas y materiales piroclásticos. La Cuenca de México está limitada al sur por la Sierra del Ajusco, la Sierra de Chichinautzin, la Sierra Nevada donde se localizan los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl; limitada en el este por la Sierra de Río Frio. Sobresalen dentro de la Cuenca de México, el Cerro de la Estrella y la Sierra de Guadalupe, (Figura 3.1).

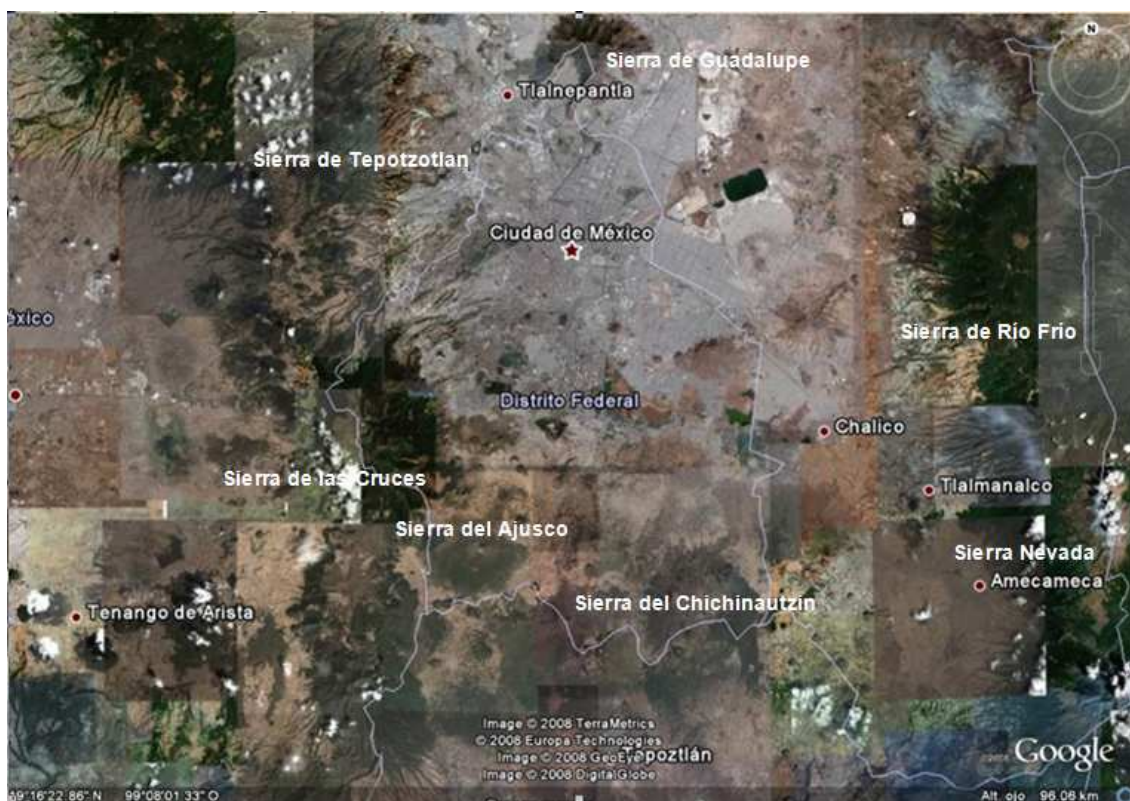


Figura 3.1. Área de estudio Web 2 (Modificado de Google Earth).

Los municipios conurbados son divisiones administrativas que han sido incorporadas a las actividades económicas, políticas y sociales de la Ciudad de México debido a su proximidad geográfica. Los Municipios que son aledaños al Distrito Federal son, Atizapán de Zaragoza, Coacalco, Cuatitlán Izcalli, Chalco, Chimalhuacán, Ecatepec, Huixquilucan, Ixtapaluca, Naucalpan, Nezahualcóyolt, Nicolás Romero, La Paz, Texcoco, Tlalnepantla. La tabla siguiente indica el número de hectáreas que se tiene para el uso de suelo y vegetación para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), además de las áreas urbanas. Para el Distrito Federal se tiene un área para el uso de suelo y vegetación de más del doble que el área urbana, esto debido a la delegación de Xochimilco la cual tiene 36000 he que se ocupan para la agricultura, 15000 he de bosque y 7000 he de pastizal, Tabla 3.1. (Web 3) El área urbana de los municipios conurbados es muy similar a la del Distrito Federal. Existe una gran cantidad de personas que laboran en el Distrito Federal pero su vivienda se encuentra en los municipios conurbados.

Tabla 3.1. Uso de suelo del Valle de México en hectáreas.

	Uso de suelo y vegetación	Áreas Urbanas (AU)
Distrito Federal	148,549.44	59,192.08
Municipios conurbados	214,135.53	49,408.77

El flujo de personas de los municipios al D.F se realiza por medio del servicio de transporte público, así como por vehículos particulares, el número de parque vehicular para el D.F es 3.4 millones de vehículos a lo cual se le suma 1.4 millones de vehiculos registrados en los municipios conurbados, Tabla 3.2. En la tabla siguiente se muestra el número de vehículos registrados hasta el 2007, obtenidos de INEGI (Web 3). El 95% de los vehículos automotores ocupan gasolina y sólo el 5% utilizan diésel.

Tabla 3.2. Número de vehículos registrados

Zona	Número de Vehículos	Total
Distrito Federal	3,413,783	4,813,920
Municipios conurbados	1,400,137	

## **Metodología**

### **3.2 Trabajo de campo**

El trabajo de campo consistió en dos etapas: la primera etapa fue la recolección de 72 muestras del lado oriente de la ciudad, la segunda etapa consistió en la recolección de 70 muestras del lado poniente de la ciudad; para un total de 142 muestras de estudio. El estudio comprendió un área de 140 km<sup>2</sup>, abarcando el Distrito Federal y Área Metropolitana, obteniéndose una malla de 35 x 40 km. En este estudio se recolectaron muestras de mano de aproximadamente un kilogramo en cada punto de muestreo, retirándose previamente los fragmentos líticos más grandes y la vegetación. La recolección se realizó con una espátula de plástico y a una profundidad de 0-5 cm.

### **3.3 Trabajo de Laboratorio**

Los suelos se dejaron secar por aproximadamente una semana a temperatura ambiente, posteriormente se tamizaron con una malla de 0.81 mm. La muestra ya tamizada se dividió para los posteriores estudios magnéticos y químicos.

### **3.4 Estudios magnéticos**

Para los estudios magnéticos las muestras se introdujeron en cubos de acrílico de aproximadamente 8 cm<sup>3</sup>. Se realizaron pruebas destructivas (aquellas que alteran los estados magnéticos de los minerales de forma irreversible) y no destructivas (aquellas que alteran los estados magnéticos pero son reversibles). Las pruebas no destructivas fueron las mediciones de susceptibilidad magnética y magnetización remanente natural (NRM). Las pruebas destructivas fueron la aplicación de magnetización remanente anhística (ARM), magnetización remanente isotérmica (IRM), obtención de las curvas  $\kappa$  vs T e histéresis.

#### ***Magnetización remanente natural***

Para medir la MRN se utilizó el Magnetómetro de giro Minispin, Molspin. En el cual la muestra es colocada en un porta-muestra e introducida en la bobina, posteriormente la muestra se hace girar, esto se realiza para las cuatro posiciones de la muestra hasta obtener la medida de intensidad magnética, la cual está dada en  $\frac{mA}{m}$ .

#### ***Magnetización remanente anhística***

Para obtener la ARM se utilizó un desmagnetizador Molspin Limited. La muestra se coloca en el centro de la bobina y se hace girar

por medio de un motor, mientras está expuesta a un campo magnético estacionario ( $H_0$ ) producido por la unidad de magnetización remanente anhistórica parcial (pARM) el cual tenía un valor de 0.5 Oe que es similar al terrestre y a un campo magnético alterno que va desde un valor máximo dado (para nuestro caso el campo tomó valores de 0 Oe, 25 Oe, 100 Oe, 400 Oe, 700 Oe, 1000 Oe, -400 Oe, -700 Oe y -1000 Oe) hasta cero. Esto se realiza para las dos posiciones perpendiculares de la muestra. Después de realizar cada magnetización remanente anhistórica la muestra es colocada en el Magnetómetro de giro Molspin, para medir la intensidad de magnetización resultante. La función del campo magnético alterno es la de relajar al sistema (eliminando los momentos magnéticos que se han orientado tanto positiva como negativamente debido a este campo) y reorientar los momentos magnéticos. La función del campo magnético ( $H_0$ ) es orientar los momentos magnéticos menores a éste.

### ***Magnetización remanente isotermal.***

Para nuestro estudio la IRM se obtuvo con un magnetizador de pulsos ASC Scientific modelo IM-10 y la intensidad de la magnetización se midió con un Magnetómetro de giro Molspin. En el magnetizador de pulsos aplicábamos campos con valores de (0 mT, 5 mT, 10 mT, 20mT, 50 mT, 80 mT, 100 mT, 200 mT, 300 mT, 500mT y 1000 mT) para la primera posición de la muestra. Con estos valores podemos obtener la curva de adquisición de IRM, (Figura 3.2). Posteriormente se colocaba la muestra en sentido opuesto a la primera posición y se aplicó un campo con valores de (0 mT, -20 mT, -100mT, -300 mT y -1000 mT), obteniendo así el campo inverso o backfield (Figura 3.3).

Los parámetros obtenidos de este gráfico son la magnetización remanente isotérmica de saturación (MRIS) y la coercitividad remanente de adquisición ( $H_{\frac{1}{2}}$ ).

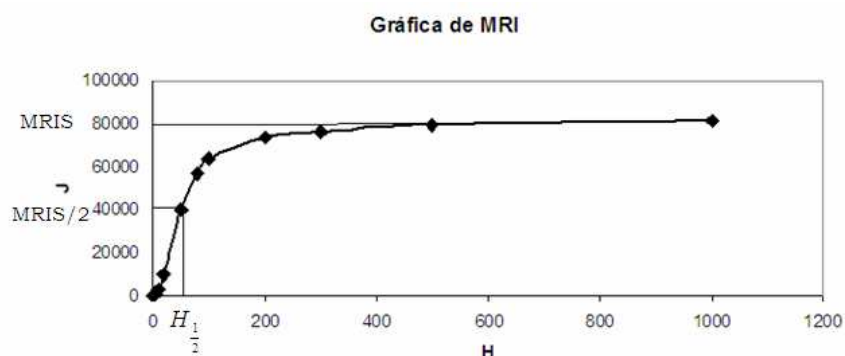


Figura 3.2. Gráfica de Magnetización Remanente Isotermal (IRM) para la muestra 3a.

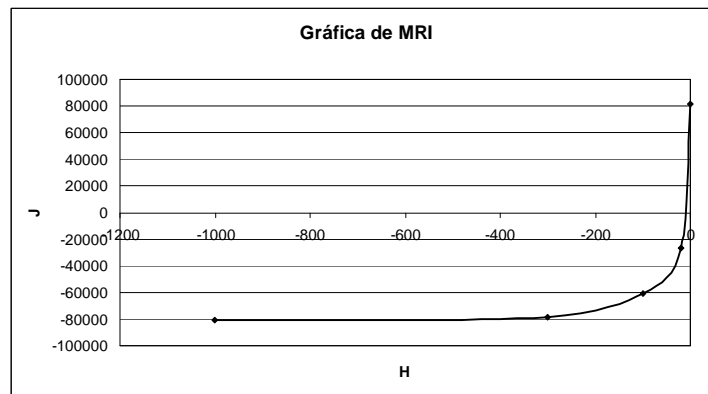


Figura 3.3. Gráfica de IRM para campo inverso.

A diferencia de la ARM este proceso se realiza sin la presencia de un campo alterno. Este tipo de magnetización ocurre naturalmente por el impacto de rayos.

### **Susceptibilidad vs Temperatura.**

Es un tipo de prueba destructiva, ya que se calienta la muestra en un horno modelo MS2WFP, el cual está conectado a un susceptibilímetro Bartington MS2 y a un sensor MS2W.

La muestra es calentada desde temperaturas de 20<sup>0</sup>C hasta los 650<sup>0</sup>C con un intervalo de medición de un grado, posteriormente la muestra es enfriada hasta alcanzar la temperatura de 50<sup>0</sup>C. Con este tipo de experimento se puede identificar la concentración mineralógica y fases presentes en la muestra debido a sus temperaturas de Curie o Néel (Tarling,1993).

### **Susceptibilidad Magnética.**

En el laboratorio la susceptibilidad magnética fue medida por dos instrumentos, el susceptibilímetro Bartington MS2 con sensor dual MS2B y el susceptibilímetro Kappabridge KLY-2. El susceptibilímetro Bartington MS2 con sensor dual MS2B permite realizar mediciones a altas frecuencias (0.47 kHz) y a bajas frecuencias (4.7 Hz). Con estas dos mediciones se calculó la susceptibilidad dependiente de las frecuencias  $\chi_{fd}$ , la cual se define como:

$$\kappa_{FD} = \frac{\kappa_{470} - \kappa_{4700}}{\kappa_{470}} X100.$$

Las primeras 72 muestras, pertenecientes al lado oriente de la ciudad fueron medidas con este equipo.

Con el susceptibilímetro Kappabridge KLY-2 además de realizar mediciones de susceptibilidad magnética también se pueden realizar

mediciones de anisotropía de rocas, tiene una alta precisión y gran sensibilidad. Las 142 muestras fueron medidas con este equipo y la susceptibilidad obtenida es la que se ocupará para realizar los diferentes cálculos y gráficas.

### **Histéresis magnética**

Para el experimento de histéresis magnética se utilizó el Magnetómetro MICROMAG AGFM modelo 2900, en el cual es colocada una pequeña muestra consolidada con pegamento en un porta muestras y suspendida en medio de los polos de un imán. En los polos del imán hay unas pequeñas bobinas que modulan el gradiente del campo aplicado. Existe una sonda detrás de la muestra que mide el campo magnético aplicado. La muestra vibra en respuesta al cambio del campo magnético y la amplitud de la vibración es proporcional al momento magnético en la dirección del campo aplicado. La vibración de la muestra es medida y calibrada en términos del momento magnético.

En rocas como en suelos las magnetizaciones son el resultado de la suma de los miles de momentos magnéticos presentes. La muestra al aplicarle un campo magnético máximo alcanzará una magnetización de saturación  $J_s$ . Cuando el campo es reducido a cero la muestra tendrá una magnetización remanente  $J_r$ , al campo magnético requerido para que esto suceda se le llama fuerza coercitiva  $H_c$ . Al incrementar el campo inverso se obtiene a coercitividad de remanencia  $H_{cr}$ , (Figura 3.4).

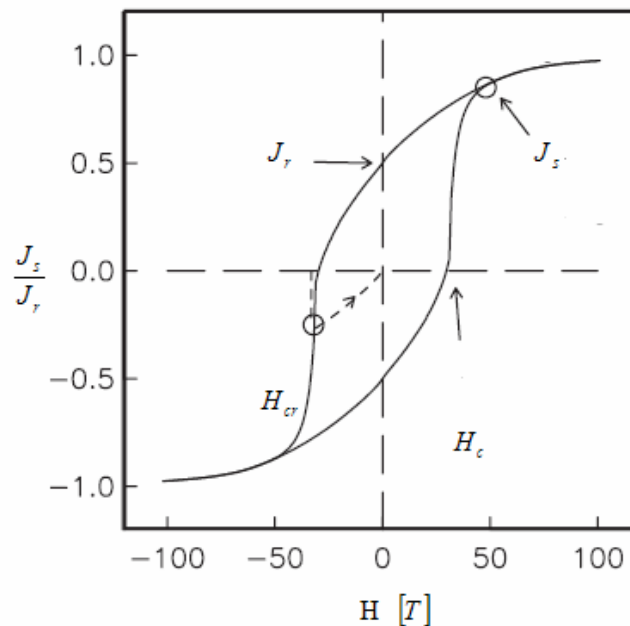


Figura 3.4. Gráfica del ciclo de histéresis (Butler, 2004).

Las gráficas de relaciones de las magnetizaciones  $J_r/J_s$  y el campo magnético  $H_r/H_c$  propuesto por Day, permiten identificar dominios magnéticos presentes en las muestras, las curvas teóricas fueron propuestas para sedimentos que contengan una mezcla de partículas con diferentes dominios.

La figura 3.5 muestra los diferentes experimentos realizados a las muestras analizadas y la secuencia de éstos.

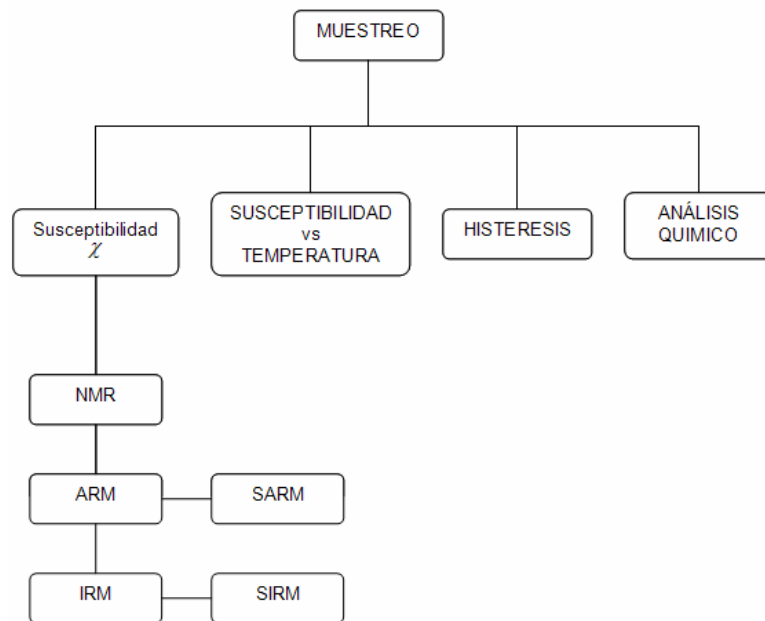


Figura 3.5 Diagrama de flujo de trabajo.

### **ARM y SIRM.**

Los parámetros de ARM y SIRM dependen sólo de los minerales capaces de retener magnetización (ferromagnéticos, ferrimagnéticos y antiferromagnéticos) una vez removidos los campos magnéticos inductivos.

### **Identificación de minerales magnéticos.**

Los parámetros de SIRM/susceptibilidad,  $H_{1/2}$  y  $H_{CR}$ , son utilizados para la discriminación de minerales magnéticos. La SIRM/susceptibilidad presenta dependencia con el tamaño de grano magnético. Si existen otros constituyentes magnéticos la señal puede analizarse por las curvas de IRM de adquisición y de campo reverso o backfield.

A partir de IRM se puede calcular el parámetro S-ratio el cual se define como  $IRM_{-300} / SIRM$ . Este parámetro relaciona la contribución de materiales magnéticamente duros (antiferromagnéticos, por ejemplo: goethita, hematita) y materiales magnéticamente blandos (ferrimagnéticos, por ejemplo: magnetita).

Los parámetros de  $SIRM / \chi$ , y  $ARM / SIRM$  son dependientes del tamaño de grano magnético. El parámetro  $ARM / SIRM$  muestra dependencia con minerales ferromagnéticos, en especial, con partículas magnéticas finas. La intensidad de ARM es dependiente de la distribución de tamaños de granos, especialmente para granos  $< 1 \mu m$ . El cociente  $SIRM / \chi$  tiene una interpretación mineralógica o de tamaño de grano.

Las mediciones de IRM son sensibles a la presencia de distintas poblaciones de granos magnéticos. Los parámetros magnéticos derivados de las mediciones de IRM de adquisición están estrechamente influenciados por los portadores magnéticos predominantes.

### **3.5 Estudios químicos**

Para los estudios químicos las muestras se analizaron con el método de ICP-MS, el cual es un método multielemental. Utiliza la técnica de plasma de acoplamiento inductivo (ICP) y la espectrometría de masas (MS); esta técnica analiza elementos traza con concentraciones menores al 0.01%. Los elementos analizados con esta técnica fueron Pb, Zn y Cu. Y mediante refracción de rayos X, los porcentajes de  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , MnO, MgO, CaO,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $P_2O_5$  y la concentración en ppm de los elementos, Rb, Sr, Ba, Zr, V, Cr y Ni.

Las muestras se analizaron en el Laboratorio de Espectrometría Plasma-Masas (ICP-MS) del Instituto de Geofísica a cargo de la Dra. Ofelia Morton Bermea.

El análisis por fluorescencia de Rayos X se realizó un espectrómetro secuencial SSRS 3000, en el LFRX-LUGIS, del Instituto de Geología bajo la dirección del Quím. Rufino Lozano.



## Capítulo 4. Análisis de Datos y Resultados

### Análisis de Datos

Los recientes estudios de determinaciones de propiedades magnéticas han sido una herramienta para identificar portadores magnéticos en sedimentos y suelos (Thompson y Oldfield, 1986, Evans y Heller, 2003, Heller, 1998, Xue y Youn, 2006, Hanesch et al, 2003). Estos sedimentos y suelos pueden registrar los cambios y procesos climáticos, así como, incorporar en su estructura cristalina metales pesados provenientes de fuentes antropogénicas.

Las mediciones magnéticas pueden detectar la señal magnética cuya concentración es menor al 1% del total de la muestra.

Los parámetros magnéticos utilizados para este trabajo fueron susceptibilidad magnética, magnetización remanente natural NRM, magnetización remanente anhística (ARM), magnetización remanente isotérmica (IRM), obtención de las curvas  $\kappa$  vs T y ciclos de histéresis.

#### 4.1 Susceptibilidad Magnética.

La susceptibilidad magnética es la facilidad con la que un material se puede magnetizar. La susceptibilidad volumétrica se define como  $\kappa = M/H$ , donde M es la magnetización inducida volumétrica y H el campo aplicado, como M y H tienen las mismas unidades  $\kappa$  es adimensional. La susceptibilidad específica  $\chi$ , se define como la susceptibilidad volumétrica dividida entre su densidad  $\chi = \kappa/\rho$  y sus unidades son  $m^3kg^{-1}$ .

Es uno de los parámetros magnéticos más utilizados, debido a su fácil y rápida determinación, pero es una respuesta conjunta de todos los minerales magnéticos: diamagnéticos, paramagnéticos, ferrimagnéticos, ferromagnéticos y antiferromagnéticos.

La susceptibilidad magnética ha sido utilizada para evaluar la distribución espacial de la contaminación en diversos países del mundo (Maier y Scholger, 2004, Boyko et al, 2004, Hoffmann, 1999, Hanesch y Scholger, 2002). Los gráficos de Thompson permiten estimar la concentración de magnética (Thompson y Oldfield, 1986).

## 4.2 Magnetización remanente natural NRM

La magnetización remanente natural (NRM) es el tipo de magnetización que presenta la muestra antes de cualquier tratamiento en el laboratorio. La NRM depende del campo geomagnético y de los procesos geológicos ocurridos durante su formación e historia de la roca (Butler, 2004). Presenta dos componentes: NRM primaria y NRM secundaria.

La NRM primaria es la que adquiere durante su formación. La NRM secundaria es la que se adquiere después de su formación y puede alterar o esconder la NRM primaria.

La suma de ambas componentes da como resultado la NMR:

$$NRN = \text{NRM primaria} + \text{NRM secundaria}$$

## 4.3 Magnetización remanente anhistérica ARM

Es la magnetización remanente producida en el laboratorio, se trata de la combinación de un campo magnético estacionario ( $H_0$ ) y un campo magnético alterno (AF), se realiza con campos magnéticos relativamente débiles y es una forma de magnetización que no ocurre naturalmente.

## 4.4 Magnetización remanente isotérmica IRM

Es la magnetización remanente obtenida por un campo directo  $H$ , cuya intensidad toma valores de 0-1000 mT a una temperatura constante. El objeto de esta magnetización es magnetizar los granos más blandos (ferrimagnéticos), los granos medianos y los granos más duros (antiferromagnéticos) (Egly, 2004, Krivier et al, 2001).

## 4.5 Susceptibilidad vs Temperatura.

El experimento de susceptibilidad dependiente de la temperatura es utilizado para identificar de minerales magnéticos. Las variaciones de  $k$  con la temperatura permite determinar las temperaturas de Curie o Neel de diferentes minerales magnéticos.

## 4.6 Histéresis Magnética

Cuando a un material ferromagnético se le aplica un campo este comienza a magnetizarse, llegará un momento en que la magnetización deje de crecer aun cuando se incremente el campo. Al cesar el campo aplicado el material quedará magnetizado. Cuando se aplica un campo contrario al inicial, se va eliminando la magnetización, las curvas de

ambas magnetizaciones no son las mismas ya que el material tiene un retardo o inercia la cual se le conoce como histéresis magnética, con el análisis de las curvas de histéresis magnética se puede inferir el tipo de dominio magnético, así como, algunas características de magnetización de los minerales ferromagnéticos (Jordanova et al, 2006, Dunlop, 2002), (Figura 4.1).

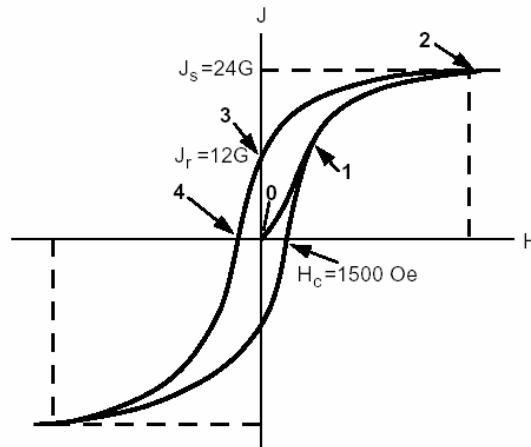


Figura 4.1. Ciclo de histéresis para una muestra sintética con 5% de partículas con dominio SD (Tomado de Butler, 2004).

Cuando se le aplica un campo un campo a una muestra, ésta comienza a magnetizarse paralelamente en la dirección del campo aplicado, puntos 0, 1, 2. Los granos magnéticos empezarán a rotar en la dirección del campo aplicado, punto 1, (Figura 4.2). Si el campo magnético se incrementa lo suficiente todos los granos con una magnetización  $J_s$  se alinearán en la dirección del campo, punto 2 (Figura 4.3).

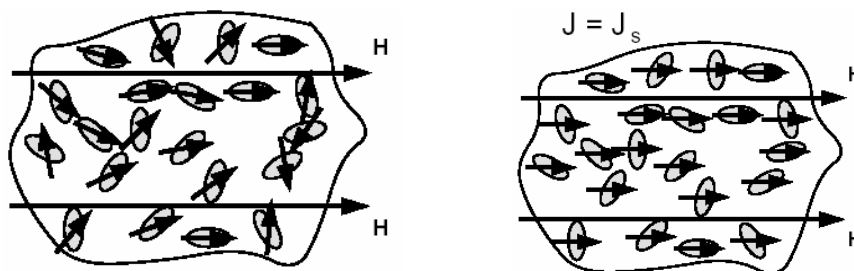


Figura 4.2. Dirección de la magnetización en el punto 1 (Tomado de Butler, 2004).

Figura 4.3. Dirección de la magnetización en el punto 2 (Tomado de Butler, 2004).

Al cesar la aplicación del campo los granos magnéticos rotan y la muestra se quedará con una magnetización remanente,  $J_r$ , punto 3, (Figura 4.4). Para regresar a una magnetización cero, se debe aplicar un

campo contrario al inicial, el campo requerido para lograrlo se le conoce como coercitividad o fuerza coercitiva,  $H_c$ , (Figura 4.5).

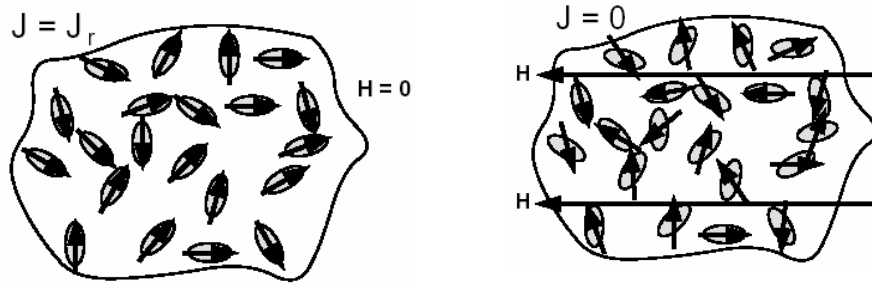


Figura 4.4. Dirección de la magnetización en el punto 3 (Tomado de Butler, 2004).

Figura 4.5. Dirección de la magnetización en el punto 4 (Tomado de Butler, 2004).

Las sustancias ferromagnéticas que presentan una gran histéresis se les llama duras y las que presentan un valor bajo de histéresis se le llama blandas.

#### 4.7 Metales Pesados

Las actividades industriales y urbanas general y emiten partículas (cenizas) contaminantes que son incorporadas en los suelos, las cenizas son generadas por emisiones provenientes de la quema de combustibles fósiles en los vehículos automotores y en los procesos industriales y durante la generación de calor y energía. Otros contaminantes son producidos por incineradores, plantas petroquímicas, refinerías, fundidoras de metales e industrias químicas, estas cenizas contienen gran concentración de metales pesados. La relación entre metales pesados y partículas magnéticas (magnetita y hematita generalmente) presentes en las emisiones antropogénicas dependen de las características y condiciones de la combustión. Diferentes autores (Xue y Youn, 2006, Guatam *et al*, 2004, Roa *et al*, 2004) han probado su relación debido a que las partículas magnéticas pueden actuar como portadores de metales pesados y otros contaminantes, ya que éstos se incorporan a la estructura cristalina de las partículas de cenizas ricas en Fe, o bien, una incorporación posterior de metales pesados en la superficie de los portadores (ferrimagnéticos y antiferromagnéticos) magnéticos generados por las actividades antropogénicas presentes en suelos. Diferentes estudios muestran que además del incremento de la susceptibilidad magnética en ciertas zonas existen relaciones lineales y logarítmicas entre este parámetro magnético y el contenido de los metales pesados (Petrovsky y Elwood, 1999; Bitjukova *et al*, 1999; Hoffmann *et al*, 1999; Xue y Youn, 2006, Hanesch y Scholger, 2002).

Muchos procesos industriales como la producción de acero y cemento, generan cenizas que son altamente magnéticas. Pero las plantas de combustión de carbón son las fuentes más significativas. El carbón no es magnético antes de ser quemado, los procesos de combustión causan que la pirita que está presente en un pequeño porcentaje, se disocie y forme pirrotita y gas sulfuro. Por encima de los 1350°K, la pirrotita se descompone en sulfuro y hierro. Las partículas esféricas de hierro con un diámetro de  $20\mu m$ , son formadas y subsecuentemente oxidadas a magnetita. Una vez creadas las partículas sufren diferentes destinos. En los niveles bajos de la atmósfera las partículas son depositadas sobre la vegetación y edificios o son depositadas inmediatamente sobre la superficie del suelo (topsoil), (Evans y Heller, 2003), (Figura 4.6).

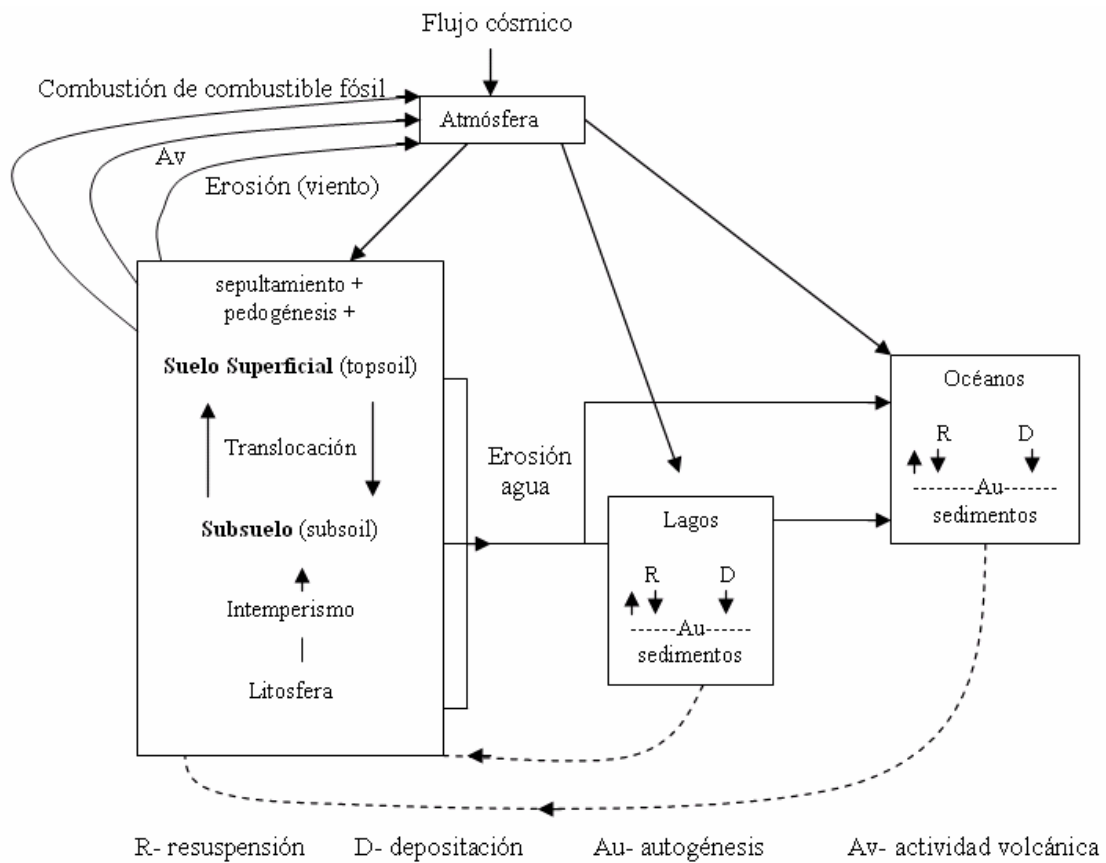


Figura 4.6. Diagrama de ciclo de minerales magnéticos.

Thompson realizó una serie de experimentos con el fin de conocer los minerales magnéticos presentes en las muestras, en la Figura 4.7 se muestra un diagrama que se utiliza para la discriminación de minerales magnéticos.

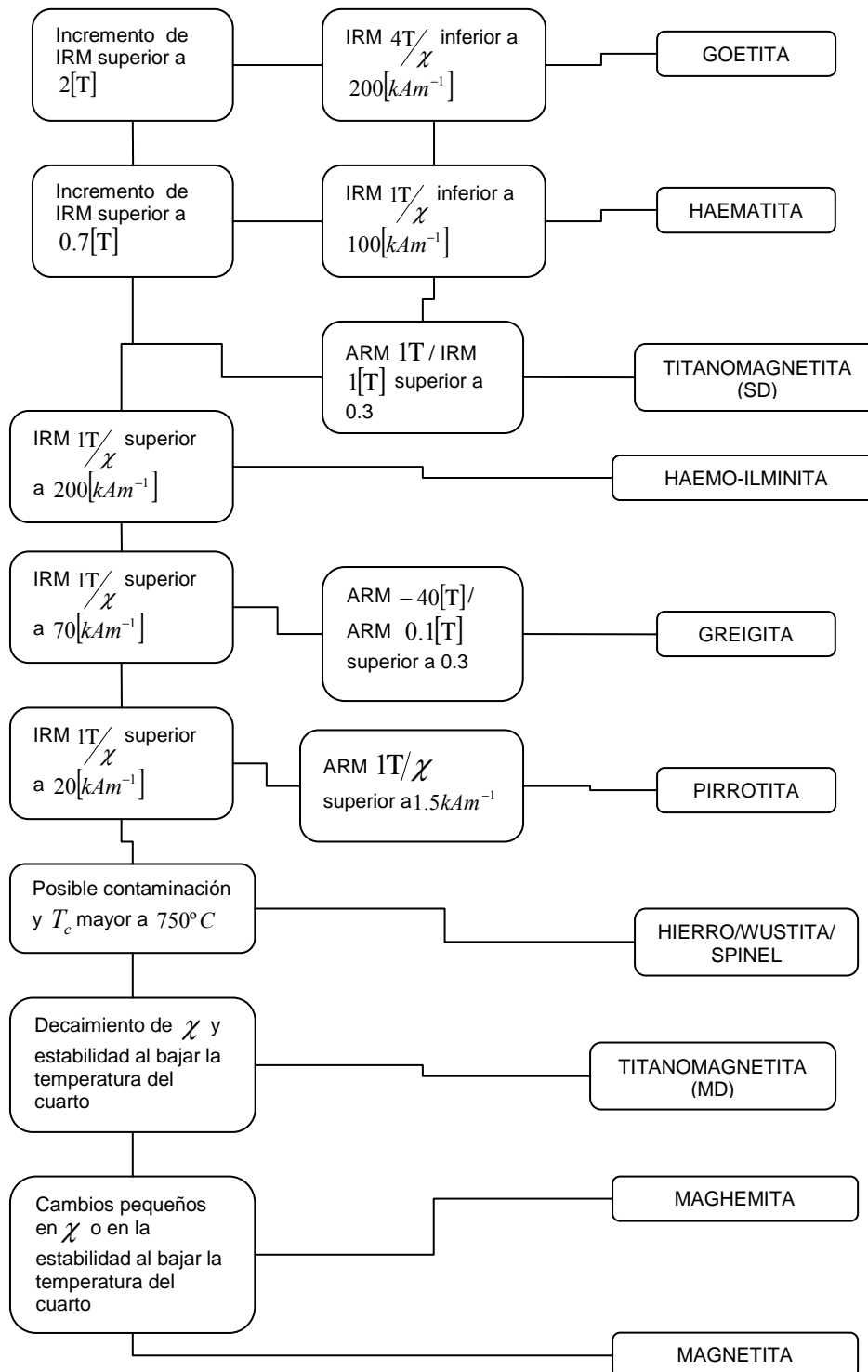


Figura 4.7. Diagrama para discriminar entre diferentes minerales magnéticos. (Modificado de Thompson, 1986).

En la Tabla 4.1 se indica la fuente de algunos metales pesados, así como, el daño que causan a la salud.

Tabla 4.1

Cr	Manufactura de aleaciones (especialmente acero), pigmentos, textiles. Es cancerígeno y los compuestos de cromo irritan los ojos la piel y las mucosas.
Cu	Buen conductor del calor y electricidad, tubos de agua, productos de cocina, químicos, equipamiento farmacéutico, pigmentos y aleaciones. La inhalación de niveles altos produce irritación en las vías respiratorias; en la sangre puede afectar hígado y riñones.
Fe	Hierro fundido, hierro forjado, acero, aleaciones, construcción vehículos, manufacturación de maquinaria.
Ni	Como aleación en la industria del acero, en baterías, pigmentos para pintura y cerámica, prótesis dentales, moldes para cerámica y contenedores de vidrio, componentes de computadoras, catalizador. Inhalación de componentes de Ni como $Ni(CO)_4$ , $Ni_3S_2$ , $NiO$ y $Ni_2O_3$ producen edema pulmonar, degeneración hepática, cáncer del tracto respiratorio y asma.
Pb	Baterías, pigmentos, cerámica, plástico, en aleaciones, soldadura, tuberías, gasolina; es introducido por contacto o inhalación, metabolizado y depositado en la sangre. .
V	Producción de acero, en aleaciones, catalizador. Su inhalación puede causar cáncer de pulmón.
Zn	En aleaciones con bronce, anticorrosivo, baterías, PVC, en medicinas, fertilizantes, insecticidas y químicos y pinturas.

## Resultados

En este estudio se analizaron un total de 82 muestras a las cuales se les realizaron experimentos magnéticos de susceptibilidad, ARM, IRM, Histéresis y Termoremanencia. Además se realizaron análisis químicos con el objetivo de identificar los metales pesados y elementos mayores; y correlacionarlos con los experimentos magnéticos. En la Figura 4.8 se muestra los puntos muestreados, así como, algunas de las principales vías de circulación vehicular (salidas a carreteras, periféricos y circuito interior).

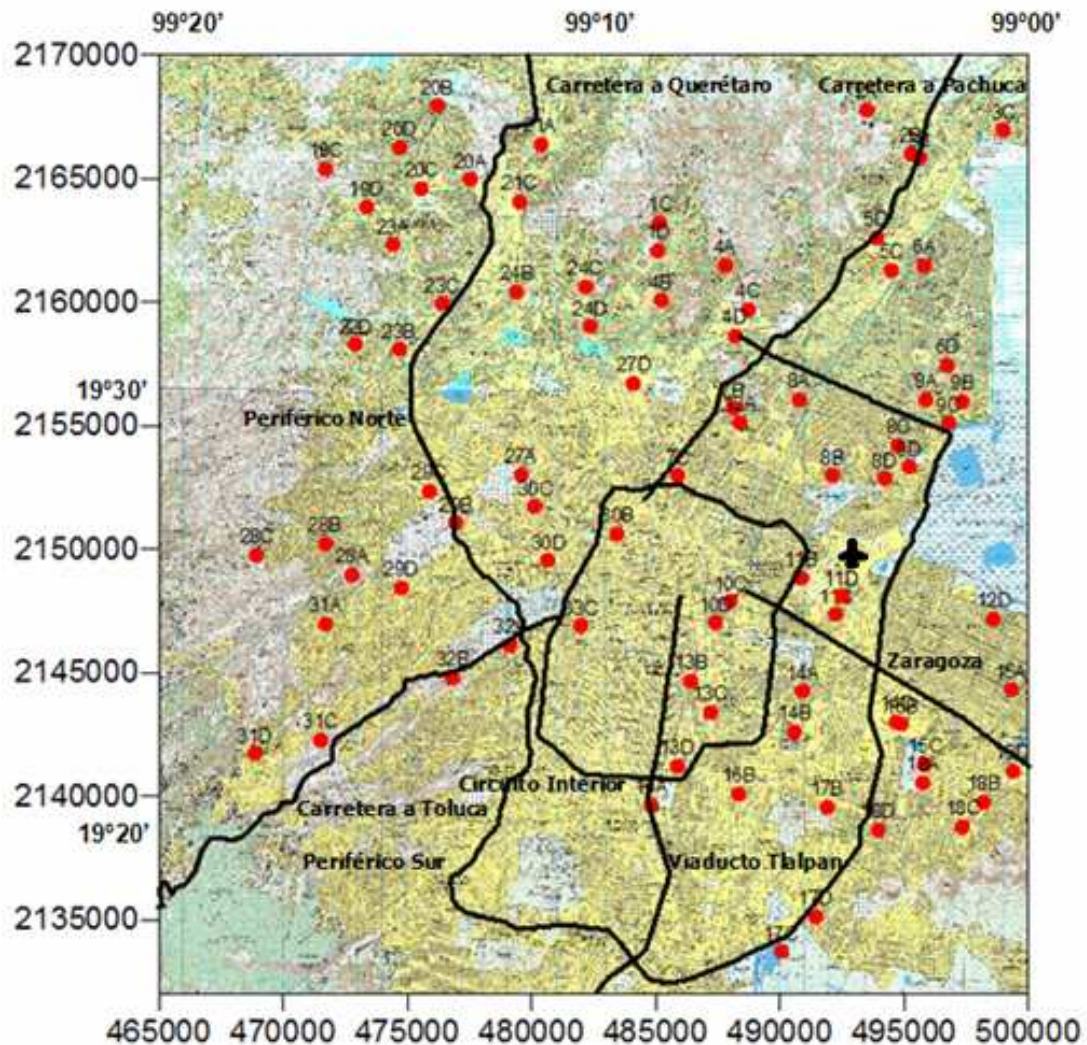


Figura 4.8. Área de estudio, puntos muestreados y principales vías.

El primer experimento realizado fue el de susceptibilidad magnética ( $\chi$ ). Este parámetro está relacionado con la concentración de minerales magnéticos, pero para este estudio representa la respuesta conjunta de minerales diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos y ferrimagnéticos. Los valores obtenidos varían en un rango de



$83-564 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  y con una media de  $301 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , ver Anexo; la media obtenida es alta si se compara con otros estudios magnéticos por ejemplo; la media en Viena es  $80.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  (Hanesch y Scholger, 2002) la cual es una ciudad metropolitana; en la ciudad de Xuzhou, China, la media es  $107 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  la cual es una ciudad con industria pesada, en particular producción de acero (Xue-Song y Young Qin, 2006).

Los valores obtenidos en la Ciudad de México nos representan un incremento considerable en óxidos de hierro (partículas ferrimagnéticas) en las cenizas depositadas en los suelos, posiblemente asociadas a la gran cantidad de vehículos automotores, y a las zonas industriales presentes en el Valle de México. Diversos autores han encontrado incremento de susceptibilidad magnética en zonas puntuales; Hoffmann demostró que existe un incremento de la susceptibilidad en las muestras tomadas perpendicularmente a una vía principal en Tuebingen, Alemania (Hoffmann *et al*, 1999). Se realizó un mapeado aproximado del área contaminada alrededor de una planta de combustión de carbón con base en el incremento de la susceptibilidad magnética (Kapicka *et al*, 1999). También se ha encontrado un incremento en la susceptibilidad en mediciones que han sido realizadas anualmente en Austria (Boyko *et al*, 2004).

En la figura 4.9 se muestra el histograma de susceptibilidad de todas las muestras analizadas, se observa que la mayor cantidad de muestras caen en el rango de  $200-450 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , un rango alto si se compara con otros estudios similares (Xue-Song y Young Qin, 2006, Hanesch y Scholger, 2002).

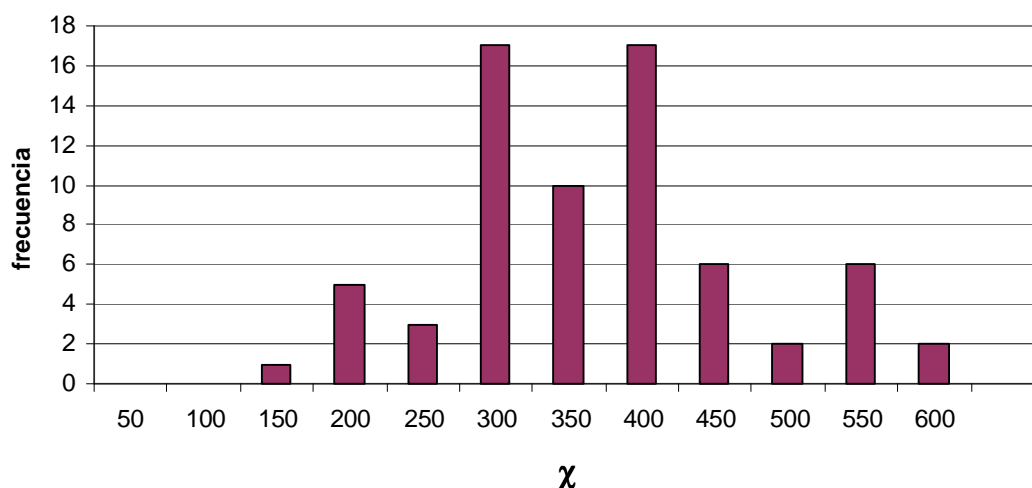


Figura 4.9. Histograma de susceptibilidad.

Para el análisis también se subdivieron las muestras de acuerdo al lugar donde fueron tomadas; esta división fue la siguiente: zona habitacional, vía rápida, áreas verdes (parques), zona industrial y cementerio:

- 36 muestras corresponden a la zona habitacional
- 22 muestras corresponden a áreas verdes
- 19 muestras corresponden a vía rápida
- 3 muestras corresponden a zona industrial
- 2 muestras corresponden a cementerio

Las muestras en la zona habitacional presentan una alta susceptibilidad magnética con un promedio de  $348 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , el área verde un promedio de  $267 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , para la vía rápida un promedio de  $302 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , para las muestras de la zona industrial se midieron susceptibilidades de 315 y  $507 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  y en las muestras adquiridas en el cementerio se midieron susceptibilidades de 404 y  $265 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ; aunque se cuenta con pocas muestras correspondientes a zona industrial, éstas presentan el valor más altos de susceptibilidad magnética, debe aclararse que es muy difícil caracterizar a una zona como únicamente habitacional en la Ciudad de México, ya que no existen áreas sin industrias en su interior.

Si se realiza un histograma de las zonas donde fueron recolectadas; se observa que las zonas divididas como área habitacional y vía rápida presentan la mayor cantidad de muestras y valores más altos de susceptibilidad magnética (Figura 4.10). Para el área habitacional la mayor cantidad de muestras las encontramos en el rango de  $200 - 500 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ; para las muestras recolectadas en vías rápidas el rango de susceptibilidad magnética va de  $200 - 450 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , y de igual forma para las áreas verdes, pero las vías rápidas si presentan también valores de los más altos en susceptibilidad y no así para las áreas verdes.

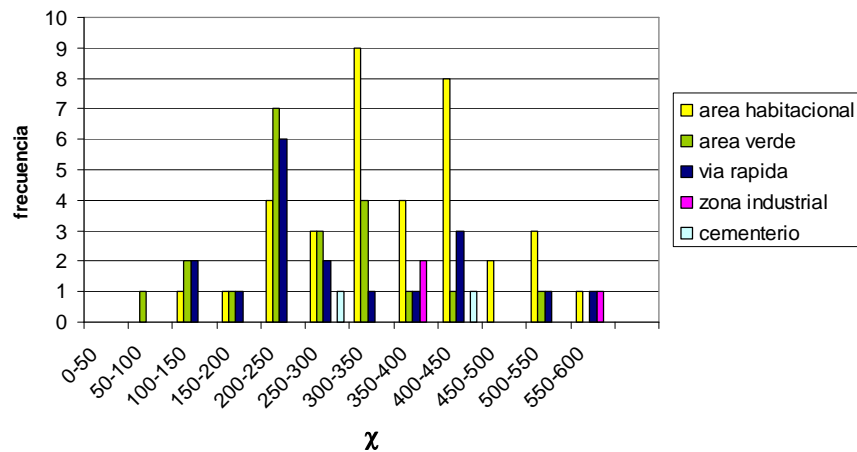


Figura 4.10. Histograma de susceptibilidad por zonas.

La distribución espacial de la susceptibilidad fue determinada usando mapas de contorno producidos en SURFER. Se utilizó el método de Kriging para la interpolación de los datos muestreados; este es un método de estimación estadística basado en la regresión, esta regresión utiliza valores llamados “pesos” obtenidos de los variogramas de la varianza de los datos muestreados, para la generación de un grupo nuevo de datos, ver Anexo (Manual SURFER 8, 2002; Jense *et al*, 1997, Web 5).

Los mapas muestran la distribución en detalle y también reflejan puntos que podrían ser fuentes o depósitos de cenizas con alta concentración de minerales ferromagnéticos.

Los valores más altos de susceptibilidad los encontramos en la parte noroeste de la zona metropolitana así como en la parte sureste, (Figura 4.11). La parte noroeste corresponde a la zona industrial del Valle de México comprende la zona de Naucalpan y Tlanepantla. La parte sureste corresponde a la zona de Iztacalco, Iztapalapa y el municipio de Nezahualcoyotl.

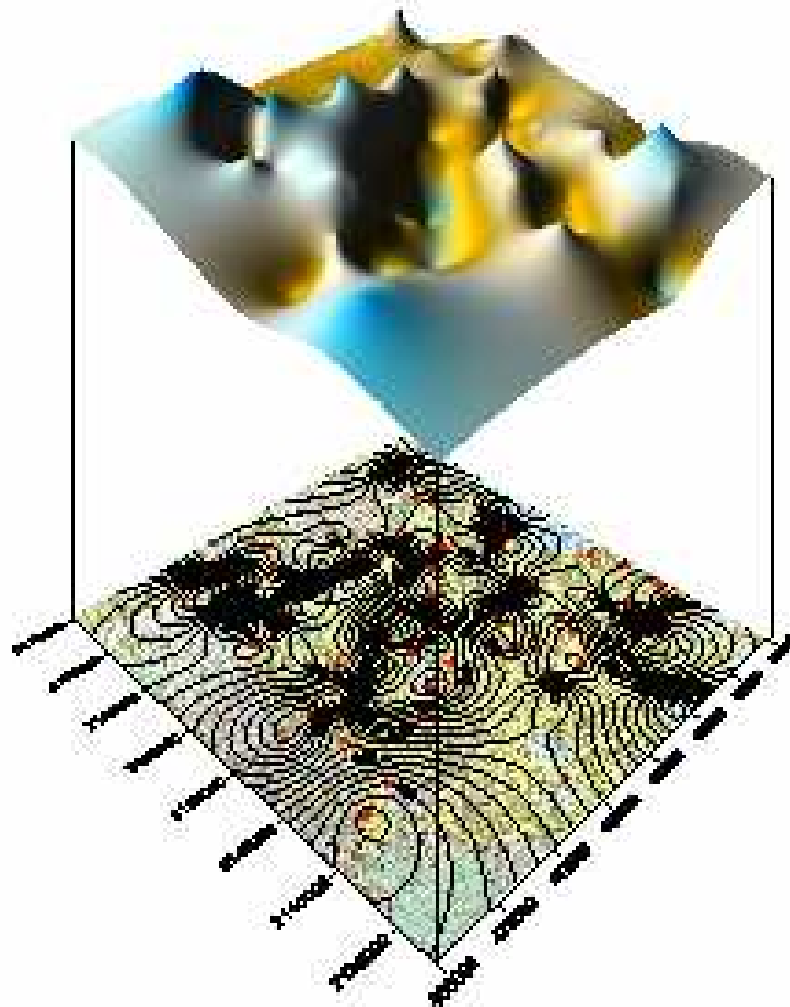


Figura 4.11. Distribución de susceptibilidad en la ZMVM.

En la Figura 4.12 se muestra la distribución de la susceptibilidad magnética, así como, las principales vías de circulación, se observan valores altos en la zona de periférico norte, Iztapalapa, en el cruce de las vías Circuito Interior e Ignacio Zaragoza.

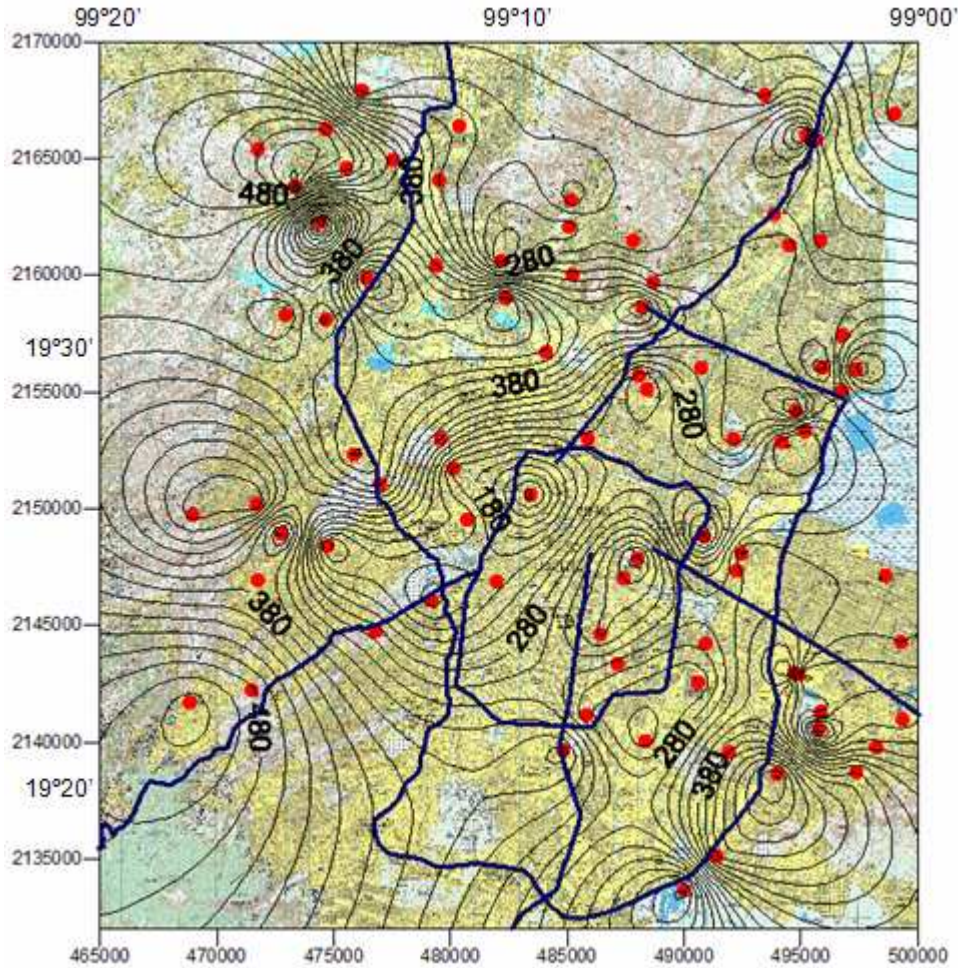


Figura 4.12. Susceptibilidad magnética y vías de circulación.

Los resultados magnéticos de susceptibilidad, NRM, SARM, SIRM  $IRM_{(-300)}/SIRM$  para las muestras recolectadas se resumen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2					
	susceptibilidad	NRM mAm <sup>2</sup> /kg	SARM mAm <sup>2</sup> /kg	SIRM mAm <sup>2</sup> /kg	$IRM_{(-300)}/SIRM$
max	564.43	281.81	567.31	68326.05	0.998978623
min	83.43005164	1.29	47.73	4550.71	0.760906755
promedio	321.5419681	64.82	269.641	27943.142	0.925473655
desviación estándar	110.9743723	73.13	99.9274	14275.978	0.039730562



El parámetro SIRM también está relacionado con la concentración magnética de minerales capaces de retener magnetización, los valores varían entre  $4550-68326 \text{ mA}^2/\text{kg}$  y el valor promedio es de  $27943 \text{ mA}^2/\text{kg}$ , ver Anexo, este valor es alto en comparación con el obtenido en la ciudad de Xuzhou, China, donde se obtuvo un valor promedio de  $16872 \text{ mA}^2/\text{kg}$  (Xue-Song y Young Qin, 2006). Los valores más altos para este parámetro los encontramos en la zona noroeste del área de estudio y en la zona sureste, (Figura 4.13). Se observan valores homogéneos en la zona central.

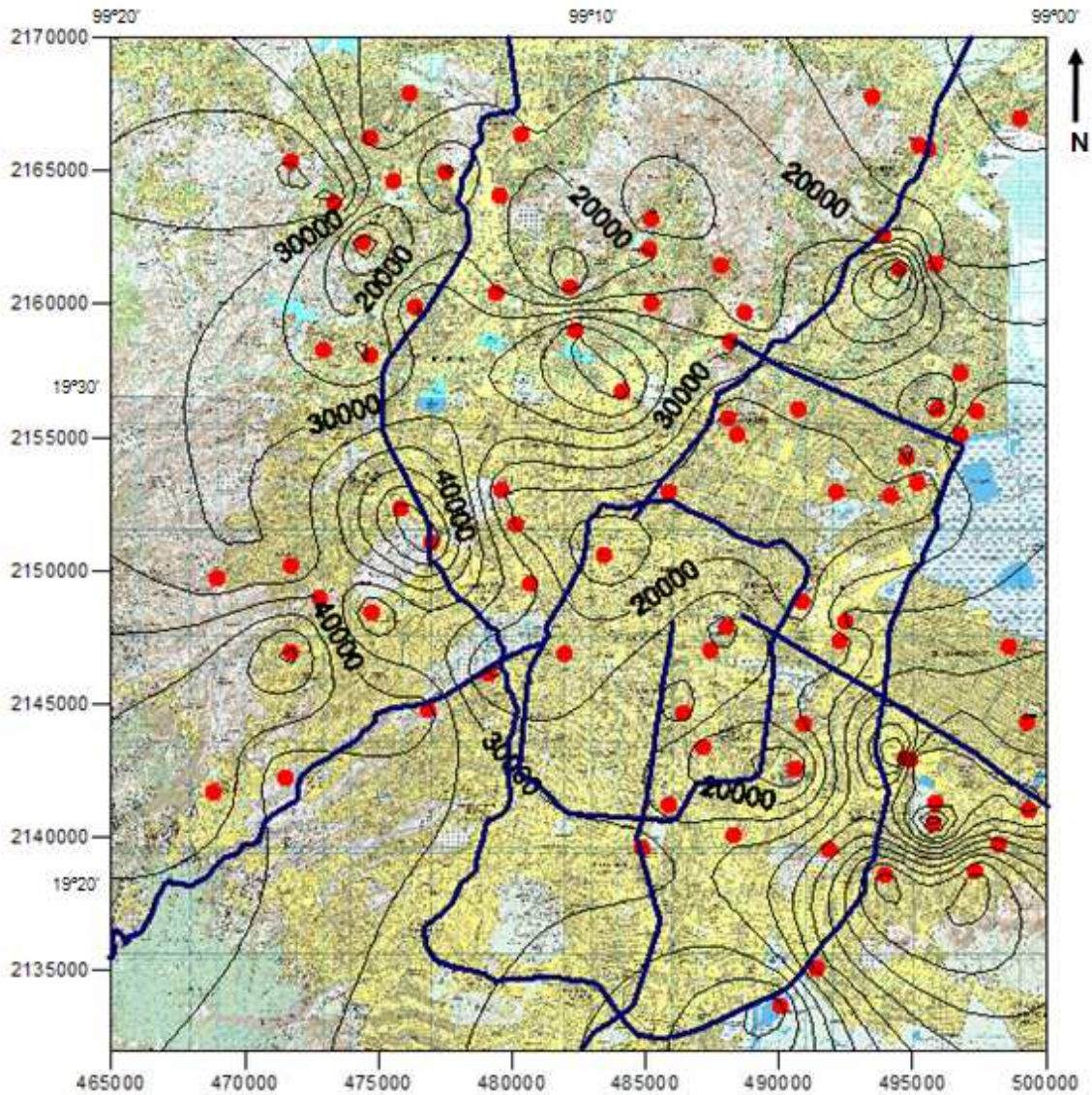


Figura 4.13. Distribución de SIRM en la ZMVM.



Los valores del parámetro SARM que depende de la concentración e interacción de granos magnéticos, varían entre  $47-567 \text{ mA}^2/\text{kg}$  y tiene una media de  $269 \text{ mA}^2/\text{kg}$ , ver Anexo. Los valores más altos los encontramos en la zona noroeste y en la zona sureste. La zona central muestra un comportamiento homogéneo, (Figura 4.14).

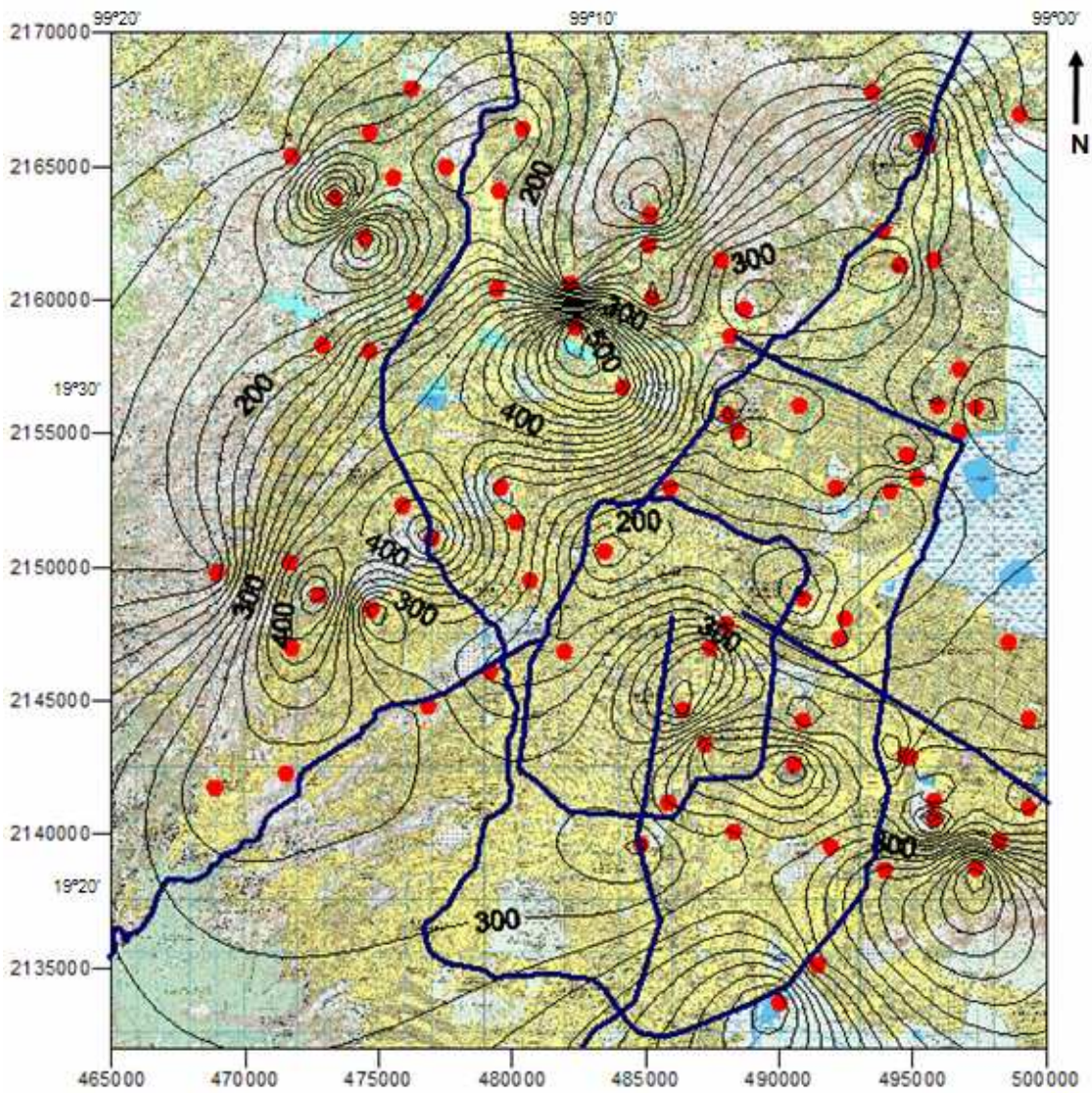


Figura 4.14. Distribución de SARM en la ZMVM.

Los tres parámetros magnéticos muestran aumento en ciertas zonas en común, caracterizándose estas como zonas de actividad industrial y de gran intensidad vehicular. La tendencia de ambos parámetros  $\chi$ , SARM y SIRM coinciden al NW con la zona de generación de partículas contaminantes y en el SE como la zona de depósito dada la dirección preferencial de los vientos que depositan las partículas contaminantes; debido a la topografía de Valle de México la Sierra de Chichinautzin impide la circulación de los vientos.

El parámetro S\_ratio es un parámetro adimensional que indica el contenido de partículas ferrimagnéticas (magnetita, titanomagnetita, maghematita) contra partículas antiferromagnéticas (hematita, goetita). Se obtiene de dividir el parámetro  $IRM_{(-300)}$  entre la SIRM. Los valores cercanos a +1 indican predominancia de partículas ferrimagnéticas; caso contrario sucede con valores cercanos a -1 que indican predominancia de partículas antiferromagnéticas (Chaparro, 2006).

La relación de S\_ratio varía entre 0.76 y 0.99 con un valor promedio de 0.92 y una desviación estándar de 0.03. Indicando la presencia de materiales magnéticamente blandos (ferrimagnéticos: magnetita, titanomagnetita).

### **Histéresis**

Con el experimento de histéresis se puede calcular los parámetros de saturación de magnetización remanente, la saturación de magnetización, la fuerza de coercitividad y la coercitividad de remanencia. El cociente de estos parámetros sirve para calcular los estados de los dominios magnéticos presentes en la muestra (Dunlop, 2002). Las muestras que fueron estudiadas mostraron un comportamiento simétrico.

La gráfica de la figura 4.15 muestra una mayor cantidad de muestras caen dentro del dominio SD+MD y una cantidad menor de muestras caen en el dominios SP+SD, de partículas ferromagnéticas, los granos multidominio son comunes de las cenizas de procesos de combustión tanto industriales como de automóviles (Flandes 1994; Hanesch and Petersen 1999).

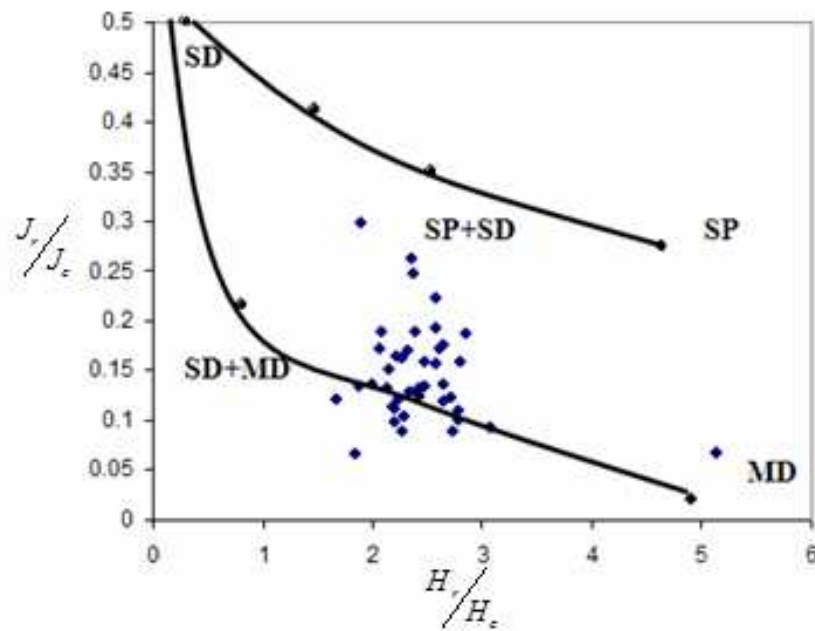


Figura 4.15. Gráfica para identificar los diferentes dominios en suelos.

### Susceptibilidad y Temperatura

Los análisis termomagnéticos son ampliamente usados para identificar los puntos de Curie de los minerales ferromagnéticos, y permiten la identificación de fases mineralógicas magnéticas (Thompson y Oldfield, 1986). Los estudios de las curvas susceptibilidad-temperatura llevados a cabo en las muestras revelaron la presencia de una fase magnética principal de magnetita, con punto de Curie alrededor de 580°C. Algunas muestras presentan comportamiento de dos fases, la temperatura de Curie de ambas fases indican presencia de titanomagnetitas. Las muestras también presentan curvas de calentamiento y enfriamiento casi reversibles. En la figura 4.16 se observa que la curva de calentamiento es reversible hasta cierto punto, también indica una fase magnética de magnetita, con una  $T_c$  de 580°C. En la figura 4.17 se muestra la gráfica de  $\chi$  vs  $T$  para la muestra 31a, la cual muestra un comportamiento de dos fases (magnetita y titanomagnetita), la curva de enfriamiento es casi reversible hasta la  $T_c$  de la muestra.



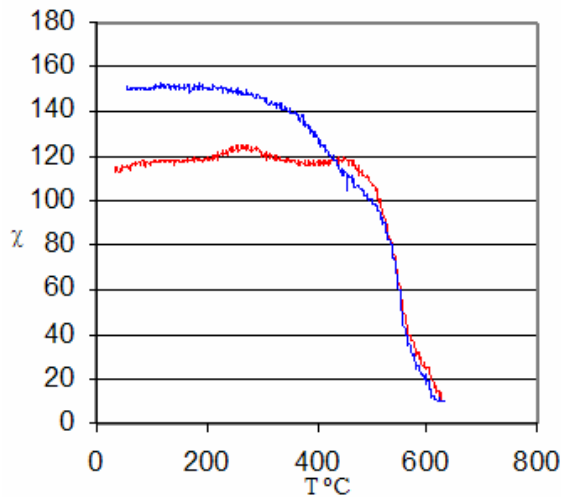


Figura 4.16. Curva de  $\chi$  vs  $T$  de la muestra 29d.

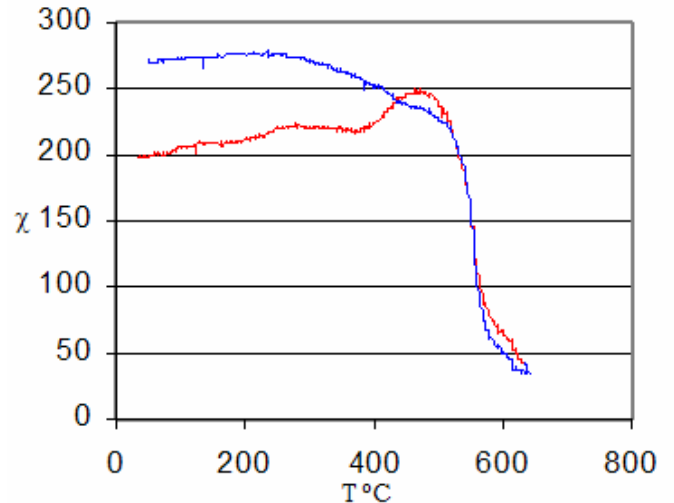


Figura 4.17. Curva de  $\chi$  vs  $T$  de la muestra 31a.

El gráfico de parámetros combinados SIRM/ $\chi$  versus coercitividad remanente,  $B_0$ , pueden usarse de forma cualitativa para la identificación de los principales minerales presentes en muestras naturales o combinadas (Xue-Song y Young Qin, 2006). En la Figura 4.18. Se observa que la magnetita y la titanomagnetita se encuentran en la parte izquierda e inferior y la hematita y pirrotita en la parte derecha y superior del gráfico.

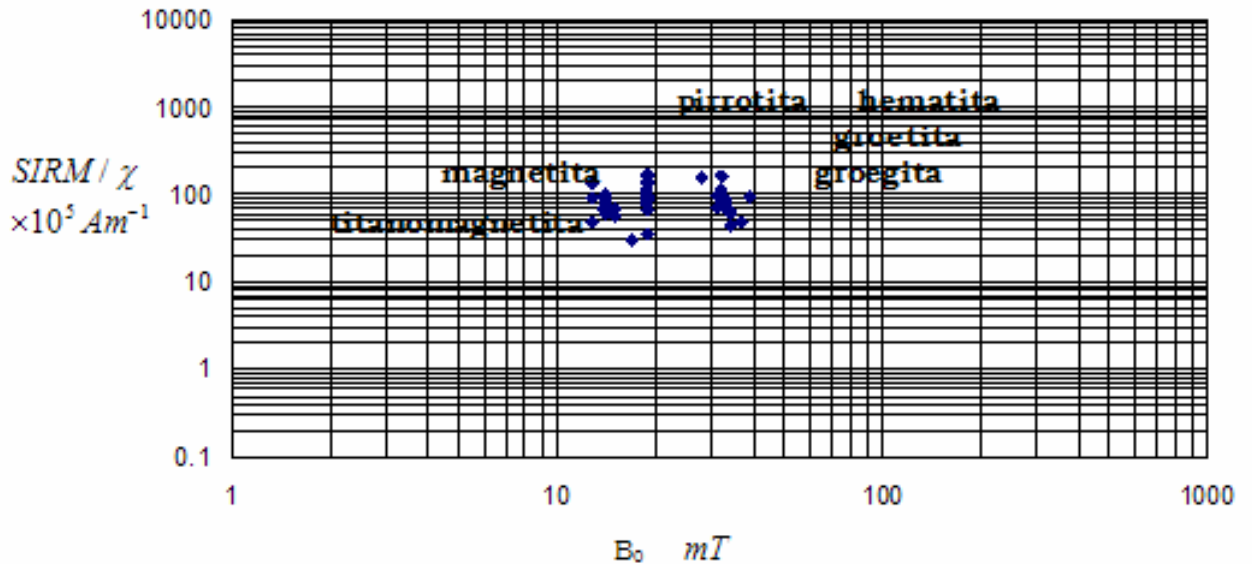


Figura 4.18. Discriminación magnética de minerales

En el gráfico se observa que las muestras estudiadas caen en el rango de magnetitas y titanomagnetitas; con rangos para la coercitividad ( $B_0$ ) de 10-40 mT; el rango para la SIRM es de 10-200  $\times 10^5 Am^{-1}$ . Estos resultados se correlacionan con los obtenidos en las curvas de susceptibilidad vs temperatura en los cuales también se observa una fase de magnetitas y titanomagnetitas. En la ciudad de Xuzhou, China, las muestras estudiadas también presentan fase de magnetitas y titanomagnetitas. (Xue-Song y Young Qin, 2006).

Las relaciones de metales pesados y los parámetros magnéticos es evaluada con coeficientes de correlación de Pearson (correlación multivariable); el cual es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables; el rango de este índice varia entre -1 y 1; 0 a 1 si la correlación es positiva y 0 a -1 si la correlación es negativa. Y se obtiene dividiendo la covarianza por el producto de las desviaciones estándar de ambas variables, algunos estudios de este tipo se han realizado en Lausitz, Alemania una ciudad industrializada con plantas de combustión de carbón, plantas petroquímicas, refinerías y plantas textiles (Spiteri *et al*, 2005); también en la ciudad de Xuzhou, China, la cual es un centro minero y de industria pesada como la producción de acero e industrias químicas (Xue-Song y Young Qin, 2006).

Los coeficientes de correlación multivariable relacionan todos los elementos analizados y los parámetros magnéticos medidos. Los parámetros magnéticos medidos y analizados con los coeficientes de correlación son  $\chi$ ,  $\kappa$ , NRM, SARM, SIRM, ARM-400, IRM-20, IRM-300, SARM/SIRM, SARM/ $\chi$ , SIRM/ $\chi$ , ARM/SIRM y IRM-300/SIRM, ver Anexo. Los elementos analizados son: TiO<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Rb, Sr, Ba, Zr, V, Cr, Ni, Cu, Zn y Pb, Tabla 4.3. Estamos considerando factores aceptables de correlación a partir de 0.3, ya que consideramos que estamos analizando suelos con una gran mezcla de partículas.

	$\kappa$	$\chi$	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	Rb	Sr	Ba	Zr	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	NRM	SARM	ARM <sub>(-400)</sub>	SIRM	IRM <sub>(-20)</sub>	IRM <sub>(-300)</sub>	SARM/SIRM	SARM/ $\chi$	SIRM/ $\chi$	ARM/SIRM	IRM <sub>(-300)</sub> /SIRM
$\kappa$	1																								
$\chi$	<b>0.79</b>	1																							
TiO <sub>2</sub>	<b>0.52</b>	<b>0.58</b>	1																						
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	<b>0.60</b>	<b>0.68</b>	<b>0.81</b>	1																					
Rb	0.26	0.02	0.06	0.12	1																				
Sr	<b>0.40</b>	0.25	0.28	0.24	0.12	1																			
Ba	<b>0.42</b>	<b>0.39</b>	0.21	0.41	<b>0.56</b>	0.07	1																		
Zr	<b>0.55</b>	<b>0.40</b>	<b>0.60</b>	<b>0.57</b>	<b>0.61</b>	<b>0.33</b>	<b>0.52</b>	1																	
V	0.13	0.07	0.21	0.22	0.13	0.27	0.17	<b>0.35</b>	1																
Cr	0.23	<b>0.38</b>	<b>0.45</b>	<b>0.63</b>	-0.21	0.11	0.17	0.18	0.20	1															
Ni	0.23	<b>0.26</b>	<b>0.37</b>	<b>0.47</b>	0.00	0.08	0.15	0.26	<b>0.32</b>	<b>0.74</b>	1														
Cu	0.23	0.21	0.19	<b>0.42</b>	<b>0.34</b>	0.20	<b>0.46</b>	0.30	0.27	<b>0.52</b>	<b>0.43</b>	1													
Zn	<b>0.32</b>	0.22	0.24	<b>0.45</b>	<b>0.52</b>	0.13	<b>0.61</b>	<b>0.44</b>	<b>0.33</b>	0.27	0.24	<b>0.73</b>	1												
Pb	0.28	<b>0.32</b>	<b>0.35</b>	<b>0.50</b>	0.10	0.21	0.26	0.31	<b>0.32</b>	<b>0.37</b>	0.16	<b>0.53</b>	<b>0.66</b>	1											
NRM	<b>0.34</b>	<b>0.37</b>	0.19	0.21	0.15	0.23	<b>0.21</b>	<b>0.28</b>	0.11	0.10	0.09	0.03	0.13	0.07	1										
SARM	<b>0.60</b>	<b>0.51</b>	<b>0.37</b>	<b>0.57</b>	0.04	0.01	<b>0.33</b>	<b>0.33</b>	0.09	<b>0.50</b>	<b>0.48</b>	0.17	0.18	0.13	0.16	1									
ARM <sub>(-400)</sub>	<b>0.45</b>	<b>0.44</b>	0.28	<b>0.43</b>	0.14	-0.09	<b>0.37</b>	<b>0.30</b>	0.00	<b>0.37</b>	<b>0.39</b>	0.15	0.12	0.01	0.14	<b>0.78</b>	1								
SIRM	<b>0.71</b>	<b>0.63</b>	<b>0.45</b>	<b>0.68</b>	-0.06	0.21	<b>0.32</b>	<b>0.30</b>	0.10	<b>0.48</b>	<b>0.34</b>	0.23	<b>0.27</b>	<b>0.32</b>	0.23	<b>0.66</b>	<b>0.32</b>	1							
IRM <sub>(-20)</sub>	<b>0.38</b>	<b>0.46</b>	0.26	<b>0.30</b>	0.18	0.04	<b>0.27</b>	0.24	0.09	0.11	0.14	0.27	<b>0.29</b>	<b>0.32</b>	0.14	0.16	0.25	0.29	1						
IRM <sub>(-300)</sub>	<b>0.73</b>	<b>0.64</b>	<b>0.44</b>	<b>0.67</b>	-0.05	0.23	<b>0.33</b>	<b>0.30</b>	0.10	<b>0.46</b>	<b>0.32</b>	0.23	<b>0.28</b>	<b>0.34</b>	0.25	<b>0.67</b>	<b>0.33</b>	1.00	<b>0.31</b>	1					
SARM/SIRM	-0.33	-0.33	-0.30	-0.35	0.07	-0.33	-0.21	-0.17	0.14	0.21	-0.05	-0.19	-0.24	0.30	-0.14	0.05	0.28	-0.62	-0.27	-0.61	1				
SARM/ $\chi$	-0.14	-0.45	-0.21	-0.13	0.06	-0.18	-0.02	0.00	0.15	0.08	0.19	0.04	0.02	0.13	-0.14	<b>0.44</b>	<b>0.35</b>	0.02	-0.18	0.02	<b>0.38</b>	1			
SIRM/ $\chi$	0.26	-0.03	0.12	<b>0.31</b>	-0.07	0.10	0.11	0.10	0.11	<b>0.29</b>	0.21	0.15	0.20	0.13	0.00	<b>0.40</b>	0.08	<b>0.73</b>	0.02	<b>0.71</b>	-0.54	<b>0.46</b>	1		
ARM/SIRM	0.16	0.17	0.08	0.02	0.15	0.17	0.09	0.20	0.08	0.01	0.05	-0.02	0.06	0.04	0.92	0.00	0.08	-0.04	-0.01	-0.03	0.03	-0.11	-0.17	1	
IRM <sub>(-300)</sub> /SIRM	<b>0.33</b>	<b>0.30</b>	0.06	0.16	0.14	0.10	0.19	0.18	0.14	0.02	-0.08	0.11	<b>0.22</b>	<b>0.26</b>	0.19	0.21	0.21	0.11	0.21	0.18	-0.02	-0.13	-0.09	0.12	1

Tabla 4.3. Coeficientes de Correlación entre parámetros magnéticos y elementos pesados.

La susceptibilidad muestra una correlación de 0.51-0.67 con los compuestos TiO, FeO, MnO; siendo en este rango los mayores valores del factor de correlación con los parámetros magnéticos medidos, esto debido a las propiedades magnéticas que presentan los elementos Fe y Ti. También se observa una correlación alta con índices que van desde 0.31 a 0.4 para los elementos Zr, Ba, Cr y Pb, Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Coeficientes de correlación entre susceptibilidad y metales pesados

Elementos	susceptibilidad ( $\chi$ )
TiO <sub>2</sub>	0.580528099
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	0.678898033
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.472067443
MnO	0.513728308
Ba	0.386384226
Zr	0.402535867
Cr	0.375276109
Pb	0.316861082

La SARM presenta una buena correlación con un rango de 0.33-0.5 con los elementos: Ba, Zr, Cr y Ni, Tabla 4.5.

Tabla 4.5

Elementos	SARM
Ba	0.331085505
Zr	0.325608802
Cr	0.501369115
Ni	0.477297299

La SIRM también muestra una buena correlación con un rango de 0.26-0.47 con los elementos: Ba, Zr, Cr, Ni, Zn y Pb. Los cuales son derivados principalmente por emisiones vehiculares. Diversos autores han encontrado que SIRM tiene fuerte correlación con Fe, Se, Ti, Sc, Ba, Bi, Pb, Cu, Zn, Cr y Mo, los cuales son en su mayor parte derivados de emisiones vehiculares (Xue, 2006), Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Coeficientes de correlación entre SIRM y metales pesados

Elementos	SIRM
Ba	0.317644259
Zr	0.295227224
Cr	0.477514994
Ni	0.339754512
Zn	0.26685455
Pb	0.318675033

La influencia del tráfico está caracterizada por el contenido de Zn y en una menor manera por Cu y Pb. Los compuestos de Zinc han sido empleados extensivamente como antioxidantes (ejemplo: compuestos de carbon y zinc, sulfuros de zinc), también como un dispersante que mejora la lubricación de aceites. Las llantas de los vehículos al desgastarse también contribuyen al aumento del zinc en los suelos urbanos (Xue et al, 2005).

También se analizó la correlación entre metales pesados, se encontró que el Pb presenta una alta correlación con el Cu y Zn, indicando que podría proceder de una misma fuente. El Zn se correlaciona con el Cu, Ba, Rb, Zr y V, la alta correlación con el Cu podría indicar la misma procedencia, Tabla 4.7. La relación entre Cu y el Zn es muy probablemente debida a que los aceites de lubricación de los autos al oxidarse en presencia de aire y de altas temperaturas generan ácidos orgánicos corrosivos de metales. Como una gran parte de las bombas de aceite de los autos están hechas con Cu, Ni y Mo, este proceso corrosivo es la probable causa de su presencia en los suelos (Miguel *et al*, 1997).

El Ni se correlaciona con el Cr, lo cual indica una estrecha relación entre ambos elementos tanto donde son generados y la forma en que se producen, generalmente procesos industriales.

Tabla 4.7 Coeficientes de correlación entre metales pesados

	Rb	Sr	Ba	Zr	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
Rb	1									
Sr	0.122	1								
Ba	<b><u>0.5639</u></b>	0.0685	1							
Zr	<b><u>0.6113</u></b>	<b><u>0.3258</u></b>	<b><u>0.5183</u></b>	1						
V	0.1254	0.2698	0.1681	<b><u>0.34975</u></b>	1					
Cr	-0.208	0.1058	0.1716	0.18158	0.1972	1				
Ni	-0.005	0.076	0.1538	0.26397	<b><u>0.3214</u></b>	<b><u>0.7405</u></b>	1			
Cu	<b><u>0.3361</u></b>	0.1957	<b><u>0.4628</u></b>	0.29806	0.2686	<b><u>0.5153</u></b>	<b><u>0.4258</u></b>	1		
Zn	<b><u>0.517</u></b>	0.1283	<b><u>0.6131</u></b>	<b><u>0.43836</u></b>	<b><u>0.3262</u></b>	0.2715	0.2366	<b><u>0.7267</u></b>	1	
Pb	0.1014	0.2079	0.2563	<b><u>0.3093</u></b>	<b><u>0.3214</u></b>	<b><u>0.3678</u></b>	0.1584	<b><u>0.5303</u></b>	<b><u>0.663</u></b>	1

La fuente de los diferentes metales pesados en los suelos urbanos es regularmente común en la mayoría de los ambientes urbanos (zonas habitacionales, parques, vías rápidas); pero la distribución de estos metales pesados varía de acuerdo a características particulares de cada ciudad.

La centralización de la industria y la presencia de una intensa actividad humana en las ciudades han incrementado la cantidad de metales pesados en los suelos urbanos.

A continuación se muestra las gráficas de distribución espacial de los elementos Pb, Cr y Zn, y las principales vías de circulación vehicular; las gráficas de los elementos restantes se muestran en el Anexo. En la figura 4.19 se muestra la distribución del Pb, se observa valores altos en la zona norte del Valle de México, correspondiente a Naucalpan y Tlalnepantla, así como, en la vía Periférico Norte, también se observa valores de concentración altos en la zona de Viaducto Tlalpan y la carretera de Toluca.

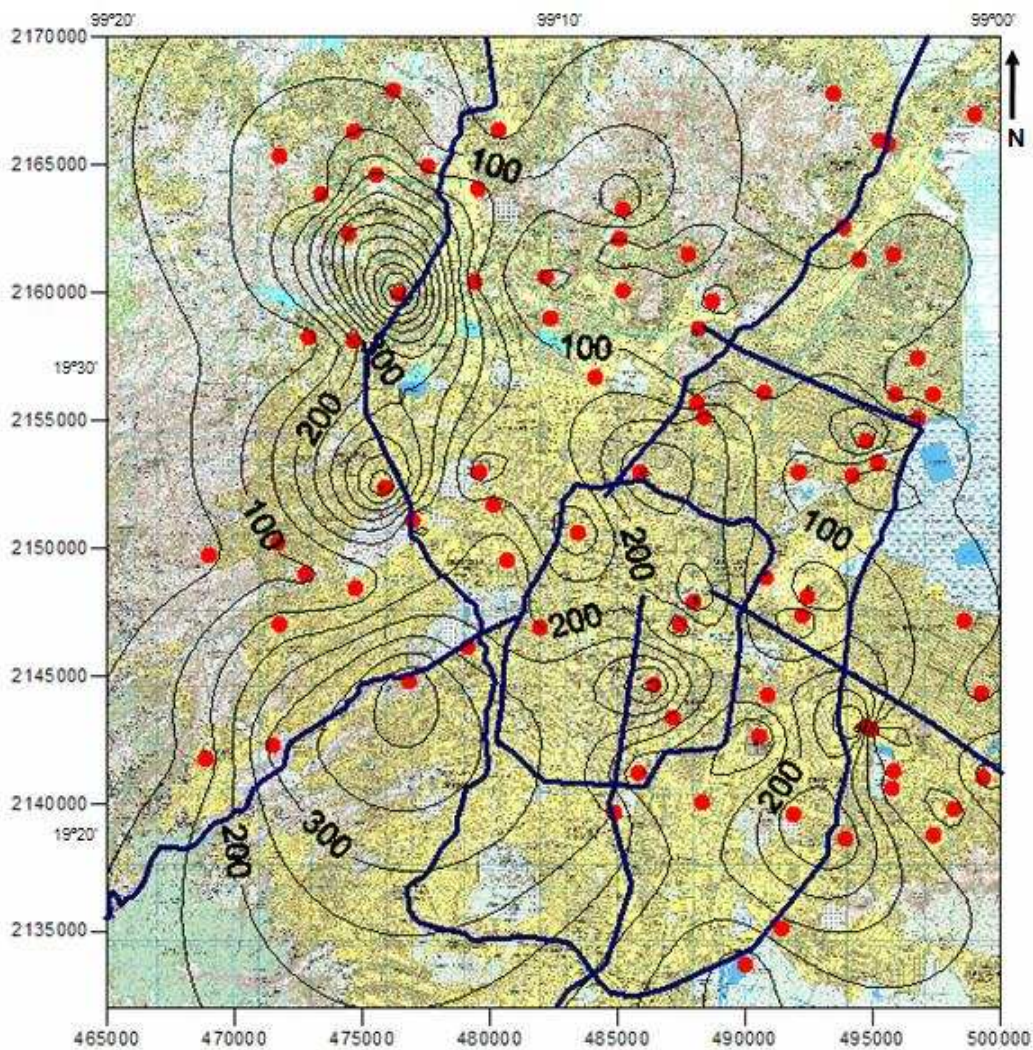


Figura 4.19. Distribución de Pb.



En la figura 4.20 se observa la distribución del Pb sin la muestra 32b, que fue retirada del análisis por sus altos valores que podían enmascarar la tendencia de los datos. Esta muestra fue adquirida en una de las vías de circulación con mayor afluencia vehicular (Avenida Constituyentes), y presenta una de las salidas del Valle de México (Carretera a Toluca).

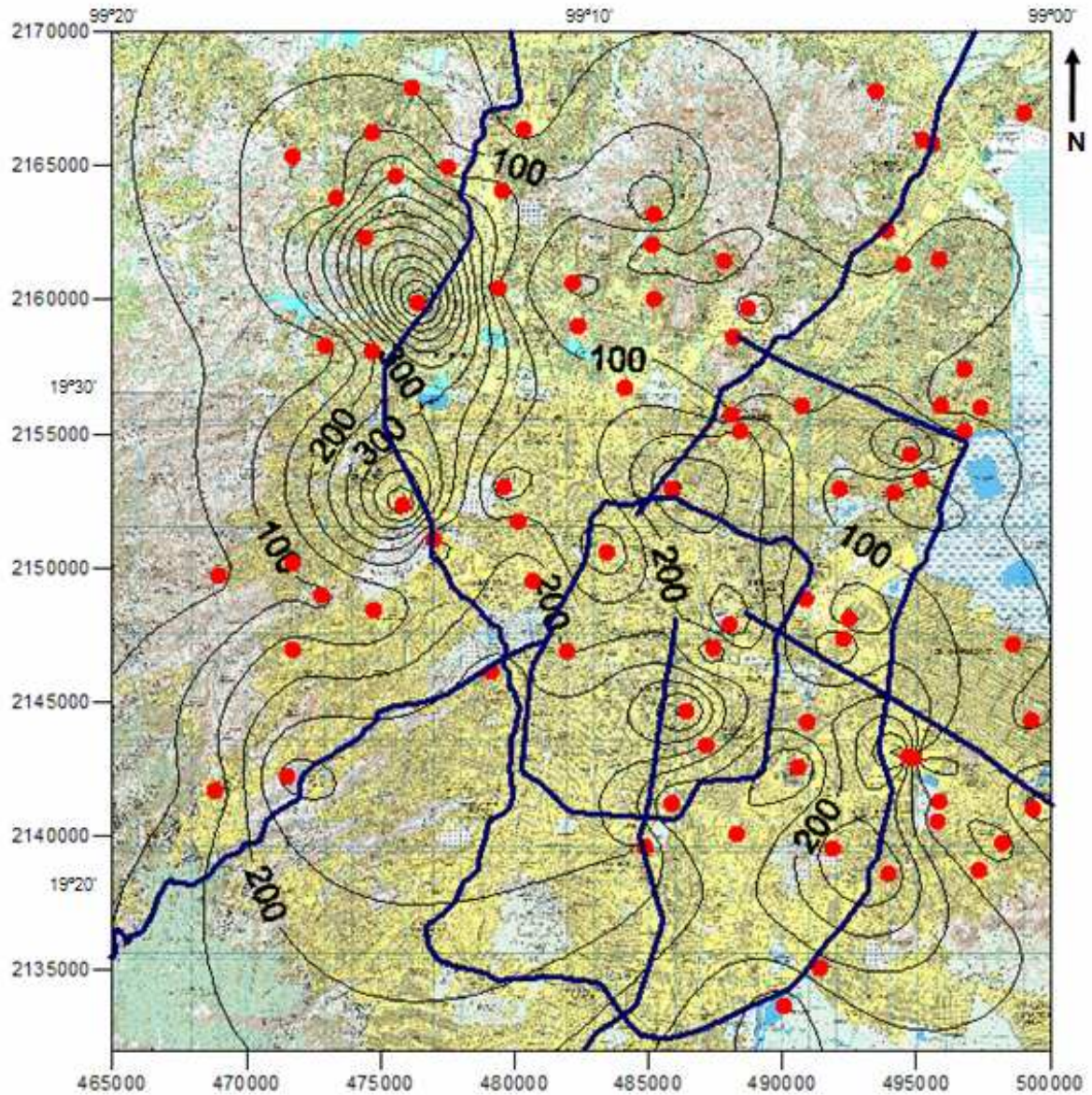


Figura 4.20 Distribución del Pb sin la muestra 32b.

Podemos observar que la tendencia se mantiene y que los valores más altos se concentran en la zona industrial del NW, seguidos por los de las vías rápidas y las carreteras.



En la figura 4.21 se muestra la distribución del Zn en el Valle de México, presenta valores altos en la zona NW del área de estudio y en el cruce de las vías Circuito Interior e Ignacio Zaragoza, estos valores corresponde a zonas industriales en el NE y a zonas de alta carga vehicular en el SE, también existe un valor alto que igual que en el Pb enmascara la tendencia de los datos.

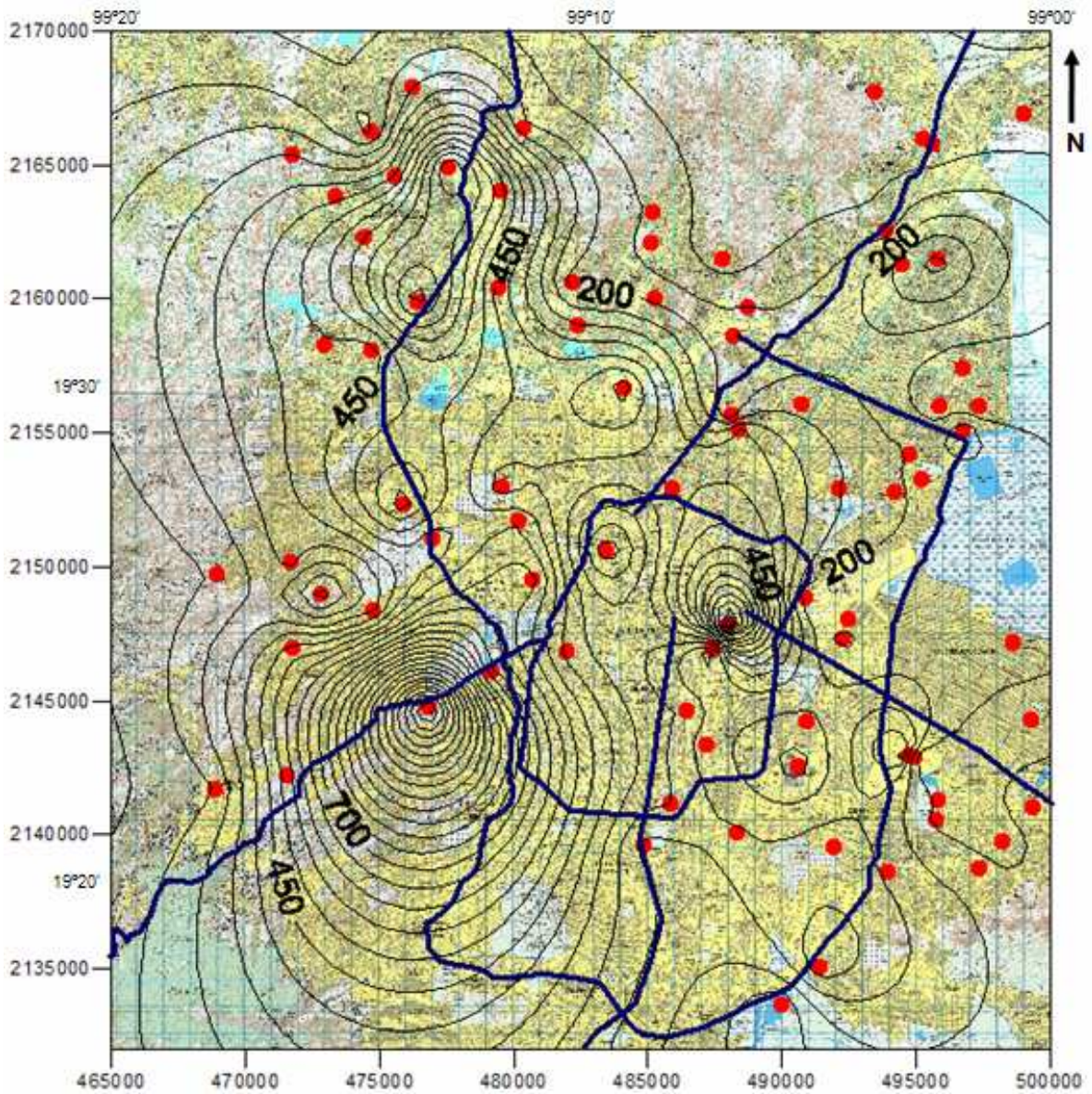


Figura 4.21 Distribución del Zn.



En la figura 4.22 se muestra la distribución sin la muestra 32b que también ha sido retirada para visualizar mejor la tendencia de los datos la cual se presenta NW-SE. En esta figura se observa una zona de altos valores de Zn alineados con la vía Periférico Norte, así como valores altos en el cruce de la vía Circuito Interior e Ignacio Zaragoza. También encontramos valores altos en la parte central, la zona comprende parte de las vías Periférico Sur, Circuito Interior y Avenida Constituyentes, todas ellas zonas de concentración vehicular, circulación más lenta y mayor frenado y por tanto mayores contenido de Zn.

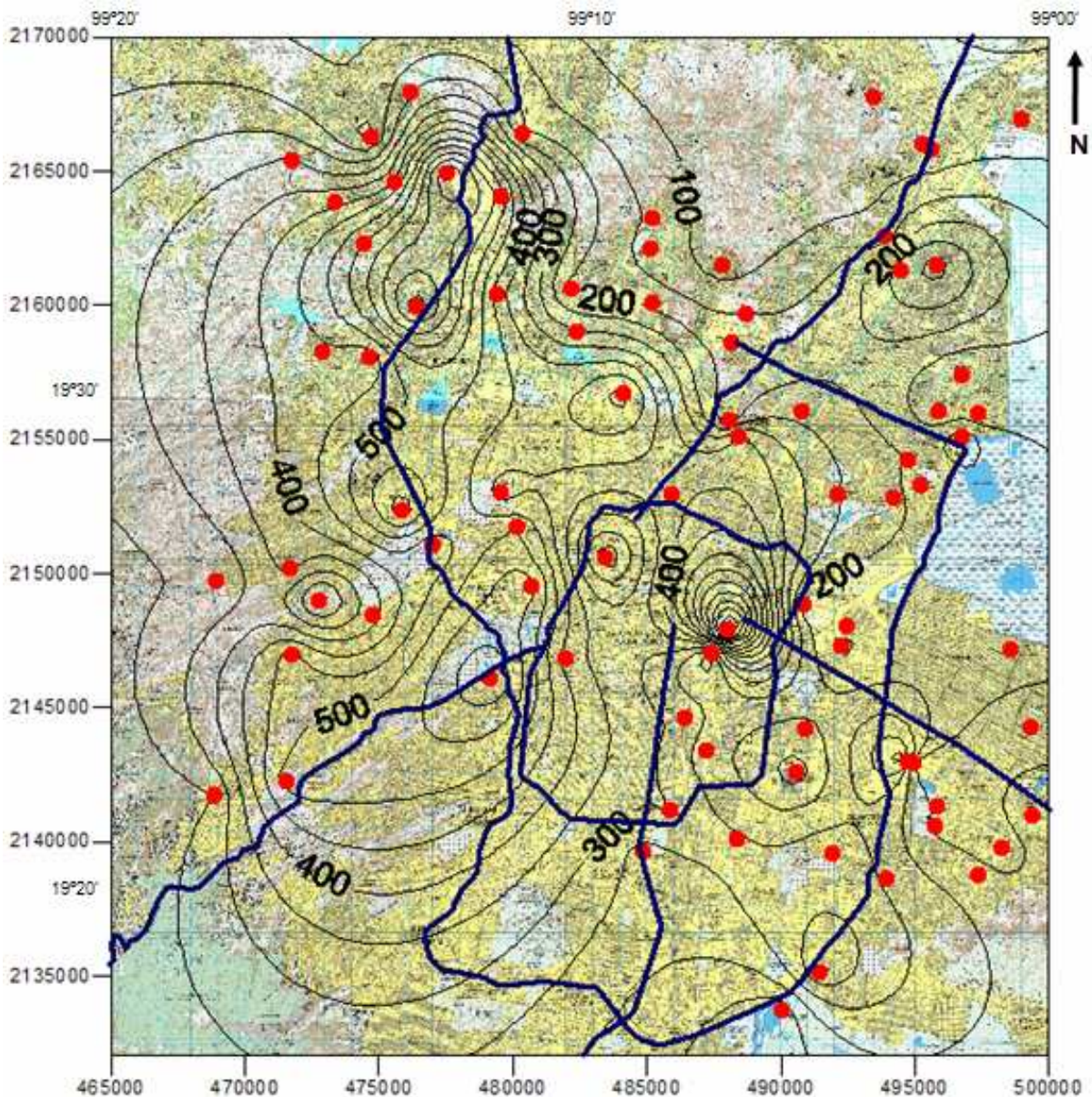


Figura 4.22 Distribución del Zn sin la muestra 32b.



En la Figura 4.23 se muestra la distribución del Cu en el Valle de México, presenta una zona con altos valores en la parte NW de igual forma que el Pb y el Zn, esto nos indica que podría existir una relación de procedencia entre ambos elementos, posiblemente misma fuente. También se observan valores altos en la parte NE, que corresponde a la salida hacia la Carretera a Pachuca, así como, en el cruce de las vías Circuito Interior e Ignacio Zaragoza y en la zona de Bosques de Aragón.

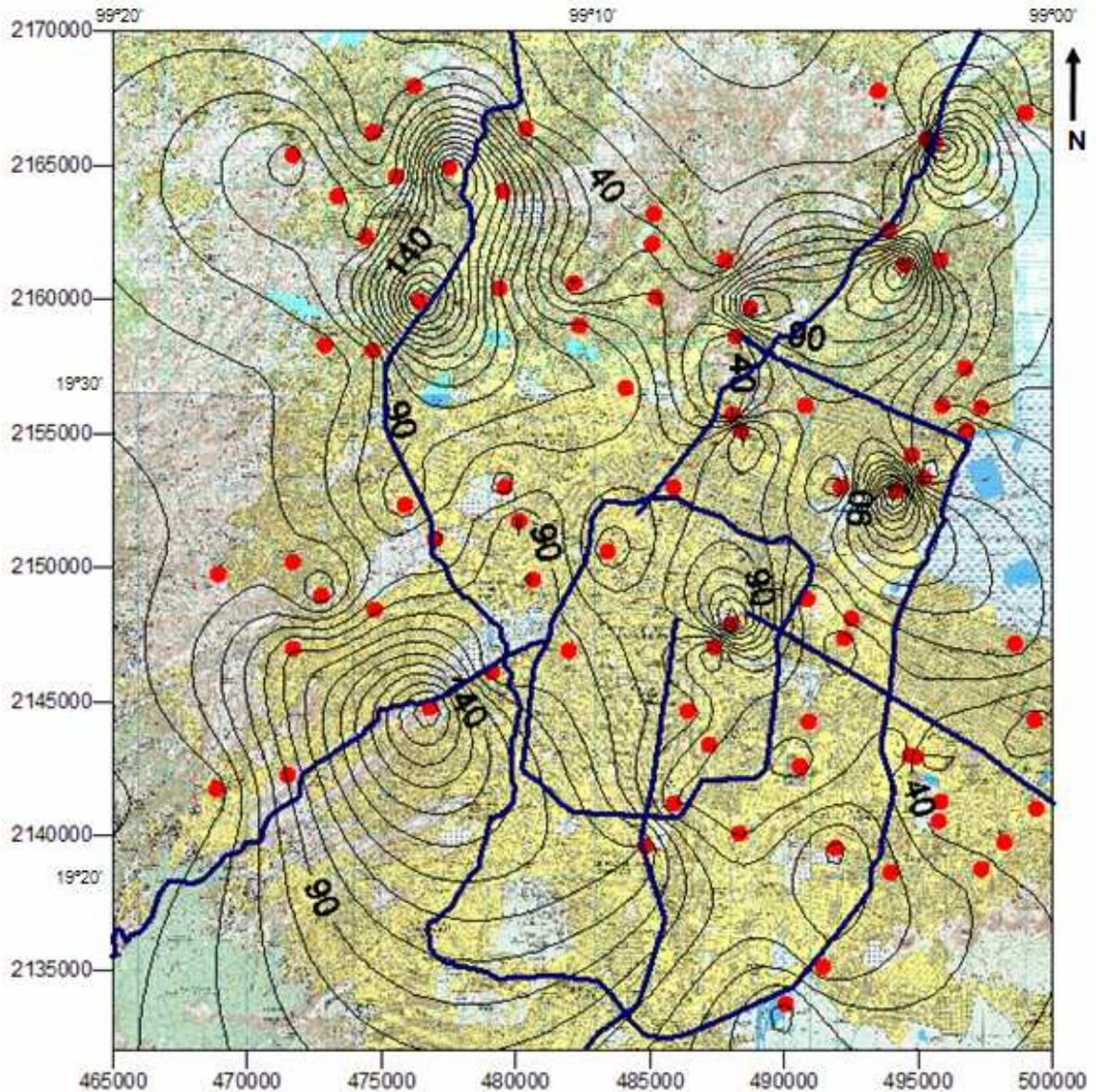


Figura 4.23. Distribución del Cu.



En la figura 4.24 se muestra la distribución del Cu si la muestra 32b, se observa misma tendencia de valores altos en las zonas NW del Valle de México, también se observa una tendencia con la vía Periférico Norte, además existen valores altos correspondientes a las zonas del cruce de las vías Circuito Interior e Ignacio Zaragoza, así como en la zona de Bosques de Aragón. Se observan valores altos de concentraciones de Cu en la parte NE, correspondiente a la salida de la Carretera a Pachuca.

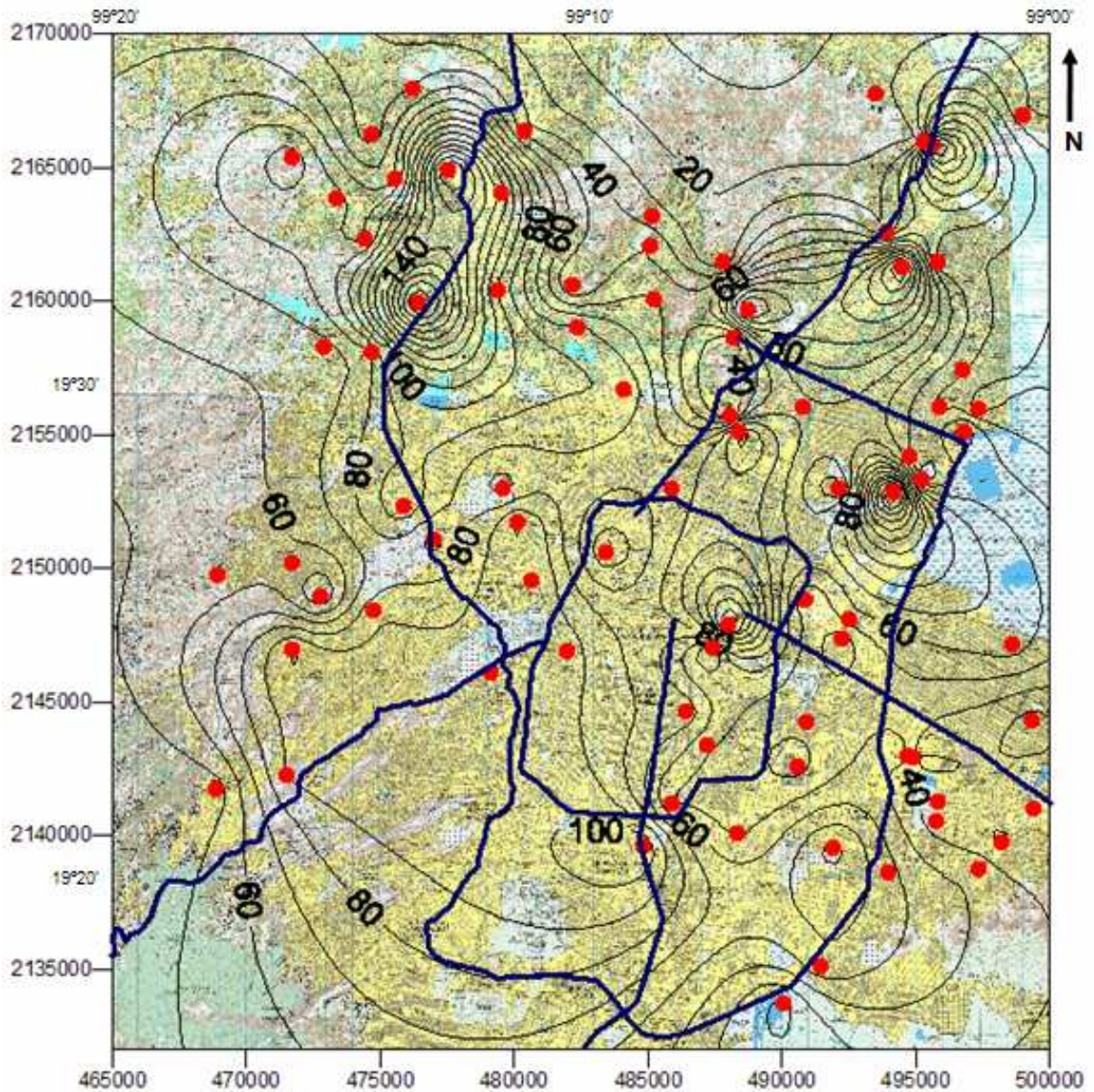


Figura 4.24. Distribución del Cu sin la muestra 32b.

## Capítulo 5. Conclusiones

Las actividades humanas, principalmente las urbanas e industriales afectan los entornos, en particular a los suelos, por la contaminación atmosférica. Las partículas derivadas de dichas actividades liberadas al medio ambiente incluyen metales pesados que son dañinos para la salud. En su mayoría contienen minerales ferrimagnéticos, debido a la incorporación de contaminantes (metales pesados) en la estructura de las partículas de ceniza ricas en Fe (presentes en los combustibles fósiles durante la combustión o una subsecuente adsorción de metales pesados a la superficie de los minerales portadores presentes en suelos).

La concentración de tales partículas dependen de varios factores, como las características del material combustible, las condiciones de la combustión y de las medidas empleadas para su filtrado antes de ser expulsadas (Kukier *et al*, 2003).

Existen conexiones entre metales pesados y los minerales magnéticos, pero muchos factores pueden diluir dichas condiciones, de acuerdo a (Kukier *et al*, 2003), una fracción de las cenizas puede ser menos resistente a los procesos de lavado que la fracción no magnética. La conexión de los metales pesados y los parámetros magnéticos ha sido exhaustivamente estudiada por un gran número de autores (Beckwith *et al.*, 1986; Heller *et al.*, 1998; Petrovsky *et al*, 1998; Bityukova *et al*, 1999; Durza, 1999; Kapicka *et al*, 1999; Petrovsky *et al*, 2000; Hanesch y Scholer, 2002; Chaparro *et al*, 2003).

Con base en estos estudios se determinaron las propiedades magnéticas de los suelos por medio de los experimentos de susceptibilidad magnética ( $\chi$ ), ARM, IRM, Histéresis y Termoremanencia. Además se obtuvieron los parámetros de SARM, SIRM,  $IRM_{(-300)}/SIRM$ ,  $SARM/SIRM$ ,  $SARM/\chi$ ,  $SIRM/\chi$ , para caracterizar los portadores de la magnetización.

La medición de la susceptibilidad magnética mostró que el valor promedio era mayor que en otros estudios similares. El valor promedio de susceptibilidad magnética para las muestras analizadas es de  $301 \times 10^{-8} m^3/kg$ ; el valor promedio para la ciudad de Viena es  $80.7 \times 10^{-8} m^3/kg$  (Hanesch y Scholger, 2002), para la ciudad de Xuzhou, China es  $107 \times 10^{-8} m^3/kg$  (Xue-Song y Young Qin, 2006), pero similares y aún menores para Manchester  $278 \times 10^{-8} m^3/kg$  (Robertson *et al*, 2002), Liverpool  $652 \times 10^{-8} m^3/kg$  (Shanju *et al*, 2001)

Los parámetros SARM y SIRM, muestran una tendencia de valores altos en la zona NW y SE del Valle de México, debido posiblemente a la dirección preferencial de los vientos y la topografía del Valle de México. También se observa una gran anomalía al suroeste,

que se relaciona con la autopista México-Toluca. El valor promedio de parámetro SARM es  $269mA\text{m}^2/\text{kg}$ , el valor promedio del parámetro SIRM es  $27943mA\text{m}^2/\text{kg}$ . El valor promedio de la SIRM en el Valle de México es mayor al obtenido en la ciudad Xuzhou, China (*Xue-Song y Young Qin, 2006*), la cual presenta características similares a la Ciudad de México.

La zona NW de la Ciudad de México presenta gran circulación vehicular, un gran asentamiento urbano y zonas industrializadas. La zona SE presenta también una gran circulación vehicular, cruces de vías rápidas, como son, Circuito Interior e Ignacio Zaragoza, además del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Todos estos factores en las zonas NW y SE de la Ciudad de México se ven reflejados en el aumento magnético de las muestras analizadas.

Como resultado del análisis del parámetro  $\text{IRM}_{(-300)}/\text{SIRM}$  se encontró que las muestras presentan un valor promedio de -0.92, indicando la presencia de materiales ferrimagnéticos (los cuales pueden ser magnetita y titanomagnetita) asociados a las actividades humanas.

Como resultado de los estudios de termoremanencia realizados se obtuvieron temperaturas de Curie ( $T_c$ ) alrededor de los  $580^\circ\text{C}$ , estas temperaturas son correspondientes a la fase de magnetita, las muestras también presentaban comportamiento de dos fases magnetita y titanomagnetita; estas fases son dominantes en las muestras de suelo analizadas. Estos resultados se correlacionan con los obtenidos con el parámetro  $\text{IRM}_{(-300)}/\text{SIRM}$ , el cual también indica presencia de minerales ferromagnéticos (magnetita y titanomagnetita). Se utilizó el gráfico de parámetros combinados  $\text{SIRM}/\chi$  versus  $B_0$ , para la identificación de los principales minerales presentes en las muestras, el resultado indica que las muestras caen en el rango de magnetitas y titanomagnetitas, apoyando los resultados obtenidos de termoremanencia.

Con el experimento de histéresis magnética encontramos que las muestras presentan combinación de dominios simples (SD), dominios múltiples (MD) y pseudos-dominio (SP), pero la mayoría caen en el rango de MD y SD; algunos autores asocian los granos MD con partículas provenientes de procesos industriales.

Así todos los parámetros de magnetismo de rocas muestran que las propiedades magnéticas medidas corresponden con las atribuidas a actividades humanas.

Se determinaron en ppm los elementos Pb, Zn y Cu por el método de ICP-MS de las muestras analizadas. Y mediante refracción de rayos X, los porcentajes de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MnO, MgO, CaO,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  y la concentración en ppm de los elementos, Rb, Sr, Ba, Zr, V, Cr y Ni.

Se encontraron buenas correlaciones entre la susceptibilidad magnética y los contenidos de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{MnO}$ , como era esperado de la propia definición de la susceptibilidad.

Se encontraron buenas correlaciones del parámetro de susceptibilidad y SIRM con los elementos Ba, Cr, Zn, Zr, Ni, Pb. Los cuales según estudios son derivados principalmente por emisiones vehiculares (Xue, 2006). Para nuestro caso el Pb, Cu, Cr, Ni y Zn, se relacionan a la zona industrial localizada al NW del Valle de México. En el SE en cruce de las vías Circuito Interior e Ignacio Zaragoza, así como, en la zona de Bosques de Aragón.

La susceptibilidad mostró un aumento en las zonas consideradas más contaminadas por emisiones vehiculares e industriales, las cuales son: zona NW, que comprende los municipios de Naulcalpan y Tlalnepantla; y la zona SE que corresponde a las delegaciones Iztapalapa, Iztacalco y el municipio de Nezahualcóyotl.

Para este estudio se encontró que la relación entre la susceptibilidad con la SIRM es mejor que con la SARM, para los elementos estudiados, llegando a obtener factores de correlación de 0.317 a 0.477, para más elementos; los mayores factores de correlación fueron con el Pb, Cr y Ni. La SARM obtuvo factores de correlación de 0.331 a 0.501, teniendo los factores más grandes con el Cr, Ni y Ba.

Observamos que las mayores correlaciones entre los parámetros magnéticos y los metales pesados se da en las vías rápidas y carreteras, como también correlaciones entre estos contenidos de metales pesados entre ellos, lo que hace suponer que provienen de una misma fuente: los combustibles fósiles y los procesos de combustión en los automotores.

Los resultados obtenidos confirman que los estudios magnéticos son una herramienta para medir índices de contaminación antropogénica asociada a metales pesados. Como los parámetros magnéticos pueden ser medidos con rapidez y costo más bajo, también permiten realizar un análisis estadístico más extenso, se pueden analizar un mayor número de muestras y con mayor frecuencia.

***Bibliografía***

Libros

Butler, Robert F., 2004. Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Boston Blackwell

Molina Luisa T. y Molina Mario J. 2005. La calidad del aire en la megaciudad de México. Fondo de Cultura Económica. 463 pp.

Evans, M. E. y F. Heller, 2003. Environmental magnetism. Principles and applications of enviromagnetics. Academic Press. An imprint of Elsevier science (USA). 299 pp.

Jensen L. Jerry, Lake W. Larry, Goggin J. David. 1997. Statistics for Petroleum Engineer and Geoscientists. Prentice Hall. Pp 293-326.

Thompson, R. y F. Oldfield, 1986. Environmental magnetism. Allen & Unwin (Publishers) Ltd. 225 pp.

Tarling, D. y F. Hrouda. 1993. The magnetic anisotropy of rocks. Chapman and Hall. 217 pp.

Revistas

Beckwith. P., J. Ellis, D. Revitt y F. Oldfield. 1998. Heavy metal and magnetic relationships for urban source sediments. Physics of the Earth and Planetary Interiors. 42, 67-75.

Bityukova L., R. Scholger y M. Birke. 1999. Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soil in Tallin. Physics and Chemistry of the Earth (A), 24 (9), 829-835.

Boyko, T., R. Scholger, H. Stanjek, MAGPROX Team, 2004. Topsoil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: repeatability of in situ measurements. Journal of Applied Geophysics., 55, 249-259.

Chaparro, M. A. E., J. C. Bidegain, A. M. Sinito, S. S. Jurado, C. S. G. Gogorza, 2003. Magnetic studies applied to different environments (soils and stream sediments) from a relatively polluted area in Buenos Aires Province, Argentina. Environmental Geology. 45: 654-664.

Chaparro, M. A. E. 2006. Estudio de parámetros magnéticos de distintos ambientes relativamente contaminados en Argentina y Antártica. Monografías del Instituto de Geofísica. No 7.

Dunlop David J. 2002. Theory and application of the Day plot ( $M_{rs}/M_s$  versus  $H_{cr}/H_c$ ). Application to data for rocks, sediments, and

soils. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107. No. B3, 10.1029/2001JB000487.

Durza O. 1999. Heavy contamination and magnetic susceptibility in soils around metallurgical plant. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 24, 6, 541-543.

Egly R., 2004. Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 851-867.

Flanders P (1994) Collection, measurement, and analysis of airborne magnetic particulates from pollution in the environment. *Journal Applied Physics* 75: 5931-5936

Guatam P., U. Blaha, E. Appel, G. Neupane, 2004. Environmental magnetic approach towards the quantification of pollution in Kathmandu urban area, Nepal. *Physics and Chemistry of the Earth* 29, 973-984.

Hoffmann, V., M. Knab, E. Appel, 1999. Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution. *Journal of Geochemical Exploration.*, 66, 313-326.

Hanesch, M., R. Scholger, D.Rey, 2003. Mapping dust distribution around an industrial site by measuring magnetic parameters of tree leaves. *Atmospheric Environment.*, 37, 5125-5133.

Hanesch, M. y R. Scholger, 2002. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements., 42, 857-870.

Hanesch M., Petersen N. 1999. Magnetic properties of a recent parabrown-earth from Southern Germany. *Earth Planetary Science and Letters* 169: 85-97.

Heller, F., 1998. Magnetic record of industrial pollution in forest soil of Upper Silesia, Poland. *Journal of Geophysical Research.*, 103,B8, 17767-17774.

Jordanova D., N. Jornadova, V. Hoffmann, 2006. Magnetic mineralogy and grain-size dependence of hysteresis parameters of single spherules from industrial waste products. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 154, 255-265.

Kapicka A., E. Petrovsky, S. Ustjak y K. Machackova. 1999. Proxy mapping of fly-ash pollution of soils around a coal-burning power plant:



a case study in Czech Republic. *Journal of Geochemical Exploration*. 66. 291-297.

Kruvier P., M. J. Dekkers, D. Heslop, 2001. Quantification of magnetic coercivity by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetization. *Earth and Planetary Science and Letters* 189, 269-276.

Kukier, U., C. Fauziah Ishak, M. E. Summer y W.P. Miller, 2003. Composition and element solubility of magnetic and nonmagnetic fly ash fractions. *Environmental Pollution*. 123. 255-266.

Maier, G. y R. Scholger, 2004. Demonstration of connection between pollutant dispersal and atmospheric boundary layer by use of magnetic susceptibility mapping, St. Jacob (Austria). *Physics and Chemistry of the Earth*., 29, 997-1009.

Petrovsky E., A. Kapicka, K. Zapletal, E. Sebestova, T. Spanilá, M. J. Dekkers y P. Rochette. 1998. Correlation between magnetic properties and chemical composition of lake sediments from northern Bohemia. Preliminary study. *Physics and Chemistry of the Earth*. (A), 23 (9-10), 1123-1126.

Petrovsky E. y B. Elwood, 1999. Magnetic monitoring of air, land and water pollution. En: *Quaternary Climates, Environment and Magnetism*. Cambridge University Press, 279-322.

Petrovsky E., A. Kapicka, N. Jordanota, M. Know y V. Hoffmann. 2000. Low field susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems. *Environmental Geology*. 39 (3-4), 312-318.

Rao S., E. Appel, D. Jordanova, V. Jornadota, F. Wehland, 2004. Magnetic Properties of road dust from Visakhapatnam (India)-relationship to industrial pollution and road traffic. *Physics and Chemistry of the Earth* 29, 985-995.

Roberson D. J., K.G. Taylor, S. R. Hoon, 2004. Geochemical and mineral magnetic characterization of urban sediment particulates, Manchester, UK. *Applied Geochemical*., 18, 269-282

Shanju X., 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. *Journal of Applied Geophysics*. 48. 83-92.

Spiteri C., Kalinski V., Rösler W., Hoffman V., Appel E., MAGPROX team. Magnetic screening of a pollution hotspot in the Lausitz area, Eastern Germany: correlation analysis between magnetic

proxies and heavy metal contamination in soils. *Environmental Geology* 49, 1-9.

Xue-Song Wang y Yong Qin, 2006. Spatial distribution of metals in urban topsoil of Xuzhou (China): controlling factors and environmental applications. *Environmental Geology* 49, 905-914.

Xue-Song Wang y Yong Qin, 2006. Magnetic properties of urban topsoils and correlation with heavy metals : a case study from the city of Xuzhou, China. *Environmental Geology.*, 49, 897-904.

Xue Song Wang, Young Qin, Shu Xun Sang, 2005. Accumulation and sources of heavy metals in urban topsoils: a case study from the city of Xuzhou, China. *Environmental Geology* 48: 101-107.

#### Paginas web

Web 1. [www.labfisbiol.unina.it/.../bar2.gif](http://www.labfisbiol.unina.it/.../bar2.gif)

Web 2. [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com)

Web 3. [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx)

Web 4. Lectures in Paleomagnetism, 2005 by Lisa Tauxe  
<http://earthef.org/MAGIC/books/Tauxe/2005>

Web 5.  
[http://www.emsi.com/gmshelp/Interpolation/Interpolation\\_Schemes/Kriging/Ordinary\\_Kriging.htm](http://www.emsi.com/gmshelp/Interpolation/Interpolation_Schemes/Kriging/Ordinary_Kriging.htm)

#### Manuales

Manual de SURFER 2002

## Anexos

Tabla de valores de  $\chi$ , NRM, SARM y SIRM.

Muestra	$\chi$	NRM	SARM	SIRM	Muestra	$\chi$	NRM	SARM	SIRM
1C	314.32	12.18	50.49	31175.16	16A	393.13	37.80	349.28	32806.82
1D	246.30	13.31	212.01	18555.61	16B	226.37	66.74	284.39	29288.36
2A	212.04	18.16	160.90	12460.10	17B	404.03	75.64	292.18	42282.83
2B	404.50	16.62	398.65	12015.78	17C	149.11	6.15	116.05	12083.65
3B	246.58	48.27	264.59	13926.99	17D	428.93	49.39	290.78	41832.97
3C	129.36	20.89	118.32	8786.46	18A	142.18	7.88	136.79	6769.48
4A	265.94	35.27	294.75	24345.51	18B	294.53	113.98	273.78	47612.97
4B	323.52	16.99	189.04	26373.96	18C	387.29	204.55	513.61	67177.79
4C	307.24	8.26	334.13	20958.99	18D	528.75	222.74	376.25	68326.05
4D	450.56	45.03	286.19	31777.53	19C	517.68	175.06	124.27	40504.47
5C	314.32	19.49	346.72	52030.52	19D	564.43	176.52	353.22	41544.02
5D	280.13	34.55	289.78	18825.87	20A	437.32	26.96	260.11	31949.61
6A	249.08	32.83	238.67	15551.84	20B	259.93	16.24	156.22	15318.60
6D	306.38	5.81	230.54	21546.69	20C	516.54	159.24	206.13	21325.98
7B	223.16	26.23	202.88	14540.49	20D	519.31	281.81	187.48	17927.71
7C	256.40	23.04	211.33	17784.83	21A	315.03	551.67	250.41	20159.05
8A	309.80	20.68	247.33	21890.93	21C	315.90	125.17	227.13	20745.60
8B	335.89	2.20	272.13	14940.58	24B	402.06	64.74	323.06	25685.00
8C	393.54	81.35	307.27	27627.61	24C	215.54	10.53	141.71	11001.00
8D	219.18	6.14	200.74	18860.76	24D	507.52	28.31	567.31	45761.37
9A	239.16	30.02	209.23	11354.70	27A	321.53	951.94	278.81	20067.57
9B	421.87	8.43	294.71	27620.01	27D	439.12	270.11	510.52	47254.56
9C	307.71	65.03	248.36	29657.92	31C	484.21	239.75	324.75	35049.76
9D	227.59	47.99	234.28	15243.02	31D	530.88	607.65	340.33	48881.06
10C	420.80	4.57	259.03	32757.47	22D	446.41	250.24	199.85	22727.07
10D	379.90	5.45	394.33	29140.07	23A	136.32	8.61	47.73	4550.71
11B	148.94	58.61	151.95	17079.38	23B	347.16	132.94	299.33	18903.44
11C	309.63	40.14	204.47	20055.13	23C	552.24	244.34	239.18	36678.80
11D	348.40	107.88	236.17	32688.48	28A	443.77	27.81	484.84	40562.91
12D	321.21	73.31	277.46	33403.26	28B	234.28	168.76	376.71	29743.29
13A	221.03	7.11	299.51	16786.28	28C	250.81	31.95	157.20	31365.69
13B	365.78	27.71	419.93	32401.67	29B	412.86	35.14	484.88	59604.51
13C	291.40	1.29	211.61	16953.26	29C	444.48	60.77	418.98	56776.51
13D	260.19	32.82	254.34	22551.12	29D	164.64	24.93	231.80	23793.51
14A	287.26	28.62	323.78	25534.65	30B	83.43	49.95	157.45	9171.61
14B	235.51	8.62	145.82	8334.29	30C	188.20	57.69	312.07	19392.96
14D	407.49	161.09	321.57	61207.42	30D	241.84	8.03	281.34	27069.34
15A	300.80	25.21	267.14	40921.48	31A	373.19	205.54	422.30	57545.37
15B	246.08	13.93	215.38	24045.69	32A	164.80	1.68	253.13	18805.82
15C	300.79	61.94	268.76	29300.75	32B	291.86	100.83	318.10	42473.32
15D	246.50	31.16	208.43	27462.21	33C	212.57	24.48	238.36	22342.07

Tabla de valores de  $ARM_{(-400)}$ ,  $IRM_{(-20)}$  y  $IRM_{(-300)}$ .

Muestra	ARM(-400)	IRM(-20)	IRM(-300)	Muestra	ARM(-400)	IRM(-20)	IRM(-300)
1C	18.69	14869.16	30116.73	16A	202.99	1669.10	31020.38
1D	109.52	7888.51	17513.01	16B	171.06	15418.73	27712.88
2A	105.56	5377.96	11135.03	17B	140.61	2439.34	38447.35
2B	305.78	1833.06	11688.14	17C	36.67	782.02	10873.12
3B	138.69	4837.16	12658.91	17D	114.64	2204.00	38208.78
3C	63.48	526.54	7294.88	18A	93.63	3352.79	6400.88
4A	184.06	9736.00	22079.75	18B	170.05	2655.25	42496.73
4B	145.00	12265.04	22467.95	18C	184.53	4354.36	60972.87
4C	245.44	7356.66	20385.45	18D	107.84	4105.25	62957.18
4D	196.56	12084.64	31729.75	19C	211.87	16701.35	38119.68
5C	214.78	3479.94	43972.75	19D	282.58	17194.21	39564.34
5D	172.21	8567.39	16953.08	20A	152.50	13615.68	29458.90
6A	145.29	6302.22	14366.46	20B	96.39	5739.77	14196.88
6D	127.56	9492.64	20785.15	20C	137.47	7027.19	20603.70
7B	156.92	1923.27	13442.28	20D	125.63	4888.70	16480.89
7C	131.35	1871.34	16805.30	21A	147.02	3398.99	20138.46
8A	157.95	2799.90	20261.33	21C	138.78	8741.51	19237.48
8B	203.55	2241.86	14141.92	24B	215.80	8414.16	23715.84
8C	253.25	2955.70	25988.05	24C	87.95	4155.12	9912.65
8D	131.12	1998.19	17188.11	24D	325.68	9046.02	40714.58
9A	148.32	1721.88	9171.64	27A	219.60	2511.36	18746.44
9B	184.18	11347.71	26499.02	27D	293.88	5243.10	44650.64
9C	157.78	14003.57	26729.95	31C	192.01	15474.79	31578.34
9D	151.67	6678.07	14221.61	31D	144.12	22248.45	47261.81
10C	147.04	15502.66	30618.62	22D	110.98	2757.24	20859.02
10D	242.12	1524.30	26769.89	23A	18.26	551.96	4308.72
11B	62.82	1077.94	15026.86	23B	199.87	2773.49	17795.29
11C	114.42	2385.72	18900.66	23C	98.86	16144.67	34678.10
11D	69.84	3050.98	32310.18	28A	207.84	5256.15	39275.78
12D	67.12	2044.49	30251.31	28B	254.06	4256.92	28739.96
13A	205.47	7529.22	15802.58	28C	47.47	2477.32	27775.48
13B	254.16	16919.37	30034.17	29B	188.32	3191.61	57024.82
13C	110.92	2098.37	15394.71	29C	225.09	22446.62	53058.73
13D	163.29	1257.41	20917.30	29D	107.77	2479.93	23611.62
14A	189.66	1443.69	23276.12	30B	84.97	4783.14	6978.74
14B	79.10	477.52	7546.26	30C	200.94	7265.00	18440.52
14D	134.22	3772.97	57803.81	30D	179.60	9491.91	26239.12
15A	191.64	2755.56	35565.57	31A	180.08	4972.00	54261.20
15B	97.22	2076.65	20633.68	32A	159.23	7448.62	18092.32
15C	152.80	1624.10	26806.49	32B	156.75	4006.50	39478.40
15D	108.89	1515.19	25490.37	33C	137.06	3128.73	21046.56

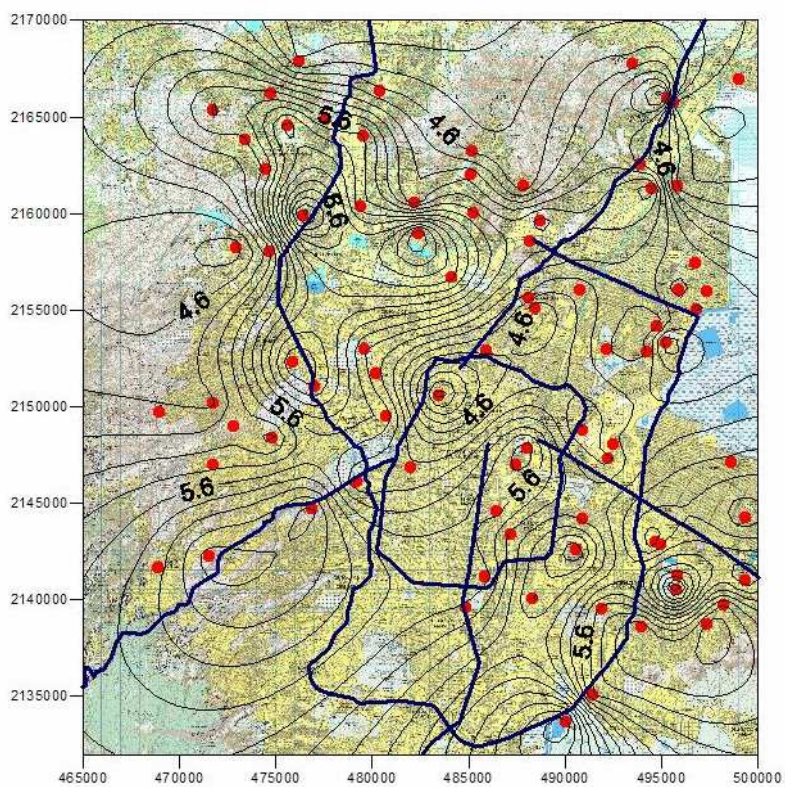
Tabla de valores de  $SARM/SIRM$ ,  $ARM/SIRM$  y  $IRM_{(-300)}/SIRM$ .

Muestra	SARM/SIRM	ARM/SIRM	IRM(-300)/SIRM	Muestra	SARM/SIRM	ARM/SIRM	IRM(-300)/SIRM
1C	0.0016	0.0004	0.9660	16A	0.0106	0.0012	0.9455
1D	0.0114	0.0007	0.9438	16B	0.0097	0.0023	0.9462
2A	0.0129	0.0015	0.8937	17B	0.0069	0.0018	0.9093
2B	0.0332	0.0014	0.9727	17C	0.0096	0.0005	0.8998
3B	0.0190	0.0035	0.9089	17D	0.0070	0.0012	0.9134
3C	0.0135	0.0024	0.8302	18A	0.0202	0.0012	0.9455
4A	0.0121	0.0014	0.9069	18B	0.0058	0.0024	0.8925
4B	0.0072	0.0006	0.8519	18C	0.0076	0.0030	0.9076
4C	0.0159	0.0004	0.9726	18D	0.0055	0.0033	0.9214
4D	0.0090	0.0014	0.9985	19C	0.0031	0.0043	0.9411
5C	0.0067	0.0004	0.8451	19D	0.0085	0.0042	0.9523
5D	0.0154	0.0018	0.9005	20A	0.0081	0.0008	0.9220
6A	0.0153	0.0021	0.9238	20B	0.0102	0.0011	0.9268
6D	0.0107	0.0003	0.9647	20C	0.0097	0.0075	0.9661
7B	0.0140	0.0018	0.9245	20D	0.0105	0.0157	0.9193
7C	0.0119	0.0013	0.9449	21A	0.0124	0.0274	0.9990
8A	0.0113	0.0009	0.9256	21C	0.0109	0.0060	0.9273
8B	0.0182	0.0001	0.9465	24B	0.0126	0.0025	0.9233
8C	0.0111	0.0029	0.9407	24C	0.0129	0.0010	0.9011
8D	0.0106	0.0003	0.9113	24D	0.0124	0.0006	0.8897
9A	0.0184	0.0026	0.8077	27A	0.0139	0.0474	0.9342
9B	0.0107	0.0003	0.9594	27D	0.0108	0.0057	0.9449
9C	0.0084	0.0022	0.9013	31C	0.0093	0.0068	0.9010
9D	0.0154	0.0031	0.9330	31D	0.0070	0.0124	0.9669
10C	0.0079	0.0001	0.9347	22D	0.0088	0.0110	0.9178
10D	0.0135	0.0002	0.9187	23A	0.0105	0.0019	0.9468
11B	0.0089	0.0034	0.8798	23B	0.0158	0.0070	0.9414
11C	0.0102	0.0020	0.9424	23C	0.0065	0.0067	0.9455
11D	0.0072	0.0033	0.9884	28A	0.0120	0.0007	0.9683
12D	0.0083	0.0022	0.9056	28B	0.0127	0.0057	0.9663
13A	0.0178	0.0004	0.9414	28C	0.0050	0.0010	0.8855
13B	0.0130	0.0009	0.9269	29B	0.0081	0.0006	0.9567
13C	0.0125	0.0001	0.9081	29C	0.0074	0.0011	0.9345
13D	0.0113	0.0015	0.9276	29D	0.0097	0.0010	0.9924
14A	0.0127	0.0011	0.9116	30B	0.0172	0.0054	0.7609
14B	0.0175	0.0010	0.9054	30C	0.0161	0.0030	0.9509
14D	0.0053	0.0026	0.9444	30D	0.0104	0.0003	0.9693
15A	0.0065	0.0006	0.8691	31A	0.0073	0.0036	0.9429
15B	0.0090	0.0006	0.8581	32A	0.0135	0.0001	0.9621
15C	0.0092	0.0021	0.9149	32B	0.0075	0.0024	0.9295
15D	0.0076	0.0011	0.9282	33C	0.0107	0.0011	0.9420

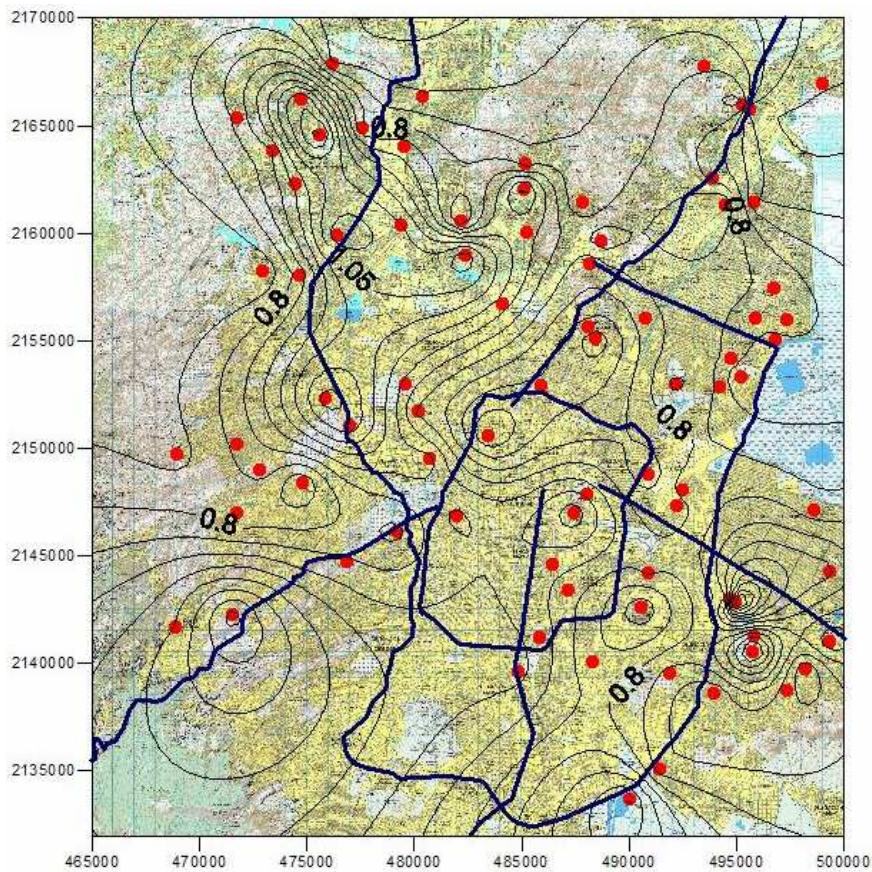
Tabla de valores  $SARM/\chi$  y  $SIRM/\chi$ .

Muestra	$SARM/\chi$	$SIRM/\chi$	Muestra	$SARM/\chi$	$SIRM/\chi$
1C	0.1606	99.18	16A	0.8885	83.45
1D	0.8608	75.34	16B	1.2563	129.38
2A	0.7588	58.76	17B	0.7232	104.65
2B	0.9855	29.71	17C	0.7783	81.04
3B	1.0731	56.48	17D	0.6779	97.53
3C	0.9147	67.92	18A	0.9621	47.61
4A	1.1083	91.55	18B	0.9295	161.66
4B	0.5843	81.52	18C	1.3262	173.46
4C	1.0875	68.22	18D	0.7116	129.22
4D	0.6352	70.53	19C	0.2401	78.24
5C	1.1031	165.53	19D	0.6258	73.60
5D	1.0345	67.20	20A	0.5948	73.06
6A	0.9582	62.44	20B	0.6010	58.93
6D	0.7525	70.33	20C	0.3991	41.29
7B	0.9091	65.16	20D	0.3610	34.52
7C	0.8242	69.36	21A	0.7949	63.99
8A	0.7984	70.66	21C	0.7190	65.67
8B	0.8102	44.48	24B	0.8035	63.88
8C	0.7808	70.20	24C	0.6575	51.04
8D	0.9159	86.05	24D	1.1178	90.17
9A	0.8749	47.48	27A	0.8671	62.41
9B	0.6986	65.47	27D	1.1626	107.61
9C	0.8071	96.38	31C	0.6707	72.38
9D	1.0294	66.98	31D	0.6411	92.08
10C	0.6156	77.85	22D	0.4477	50.91
10D	1.0380	76.70	23A	0.3501	33.38
11B	1.0202	114.67	23B	0.8622	54.45
11C	0.6604	64.77	23C	0.4331	66.42
11D	0.6779	93.82	28A	1.0926	91.41
12D	0.8638	103.99	28B	1.6079	126.96
13A	1.3551	75.95	28C	0.6268	125.06
13B	1.1480	88.58	29B	1.1744	144.37
13C	0.7262	58.18	29C	0.9426	127.74
13D	0.9775	86.67	29D	1.4079	144.52
14A	1.1271	88.89	30B	1.8872	109.93
14B	0.6192	35.39	30C	1.6582	103.04
14D	0.7892	150.21	30D	1.1633	111.93
15A	0.8881	136.04	31A	1.1316	154.20
15B	0.8752	97.71	32A	1.5360	114.11
15C	0.8935	97.41	32B	1.0899	145.53
15D	0.8456	111.41	33C	1.1213	105.10

Distribución de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

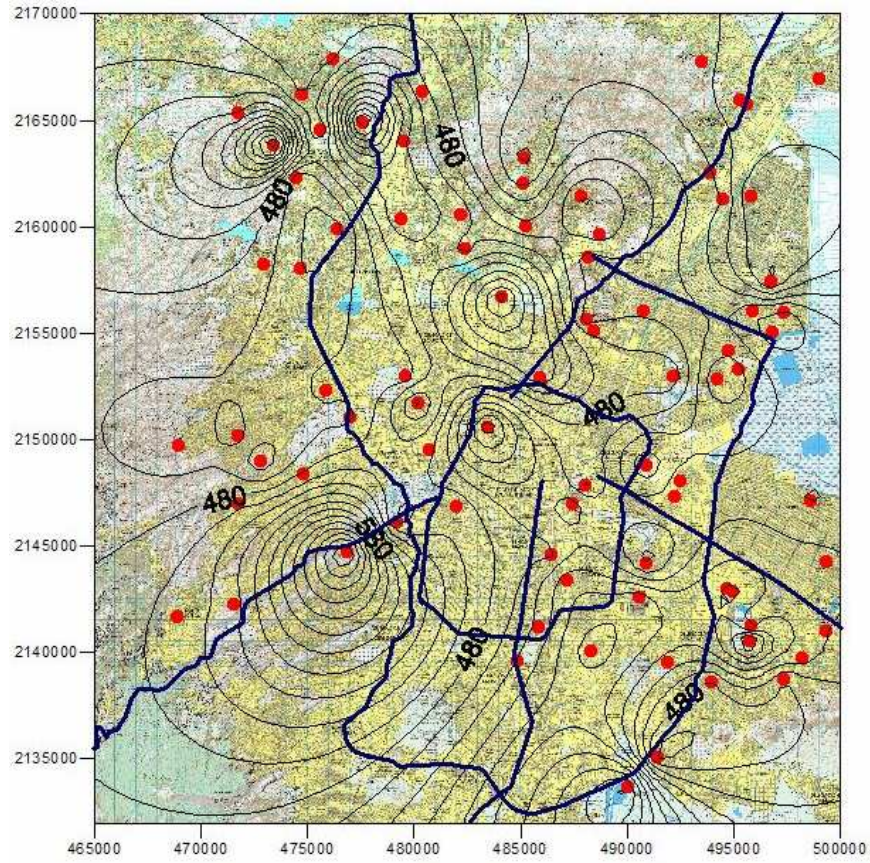


Distribución de  $\text{TiO}_3$ .

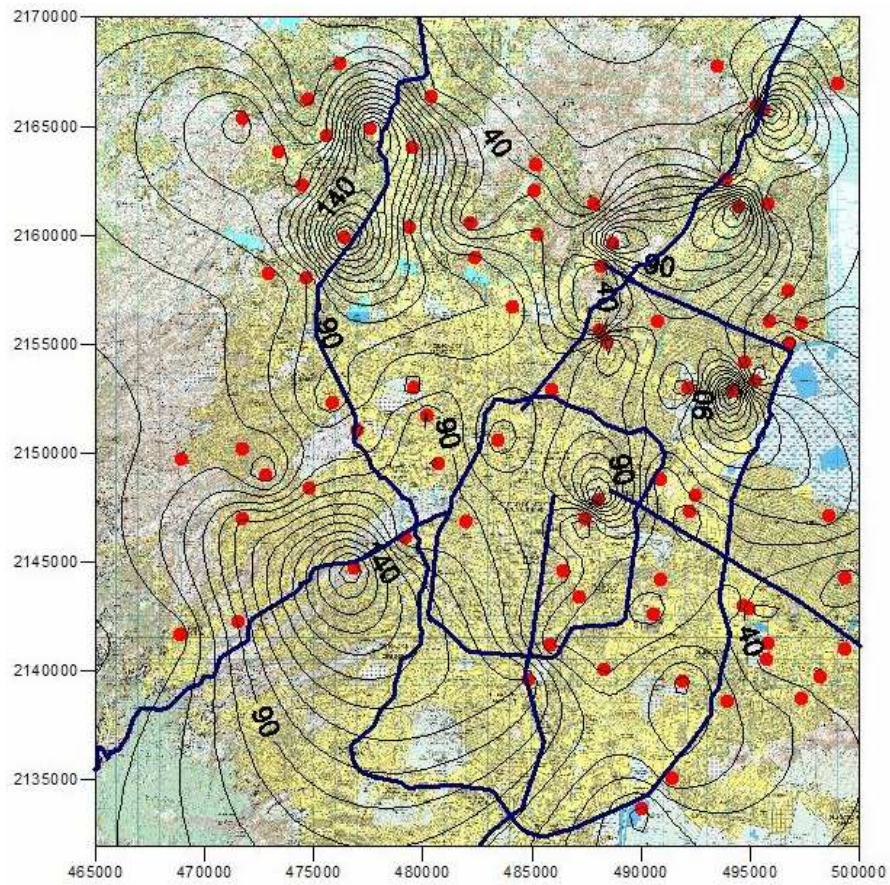




Distribución de Ba.

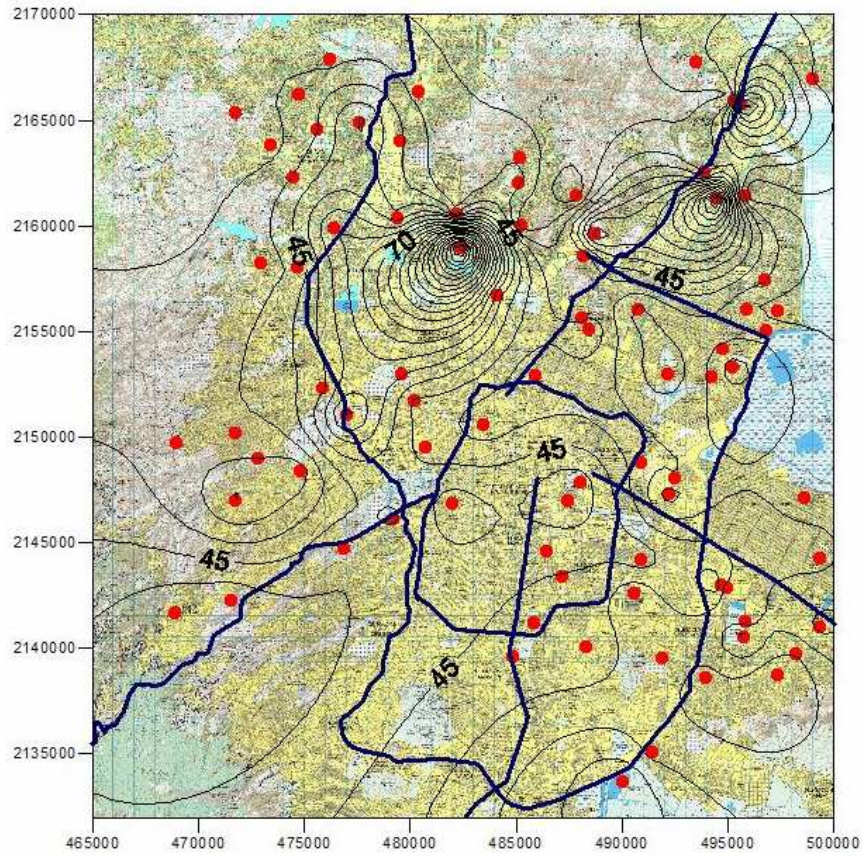


Distribución de Cu.

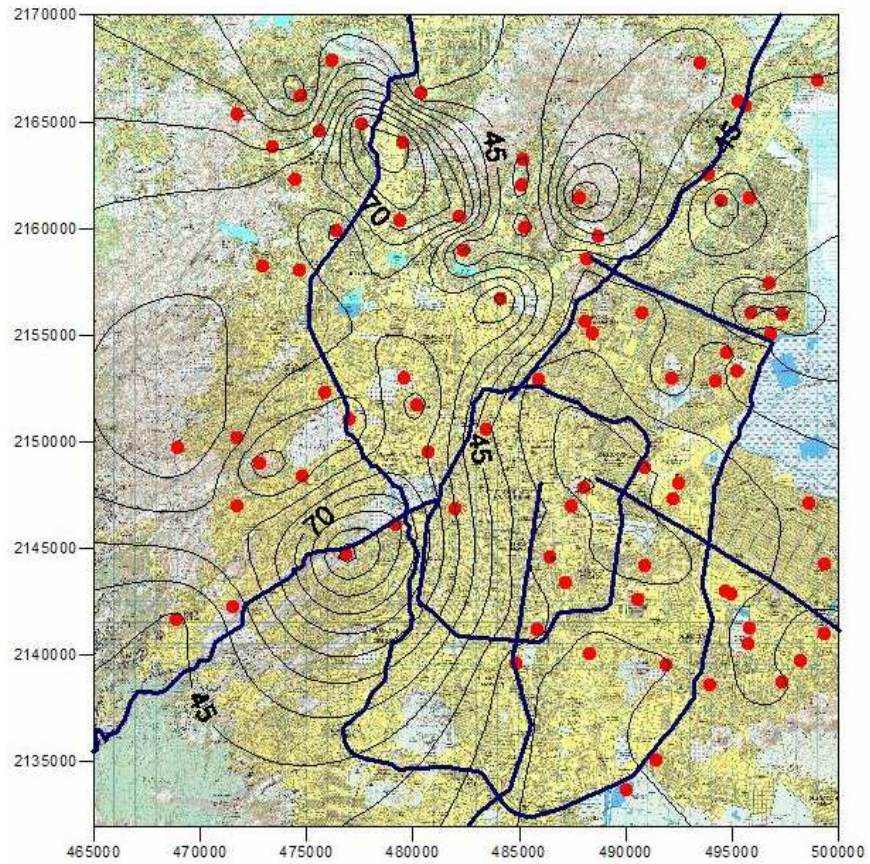




Distribución de Ni.

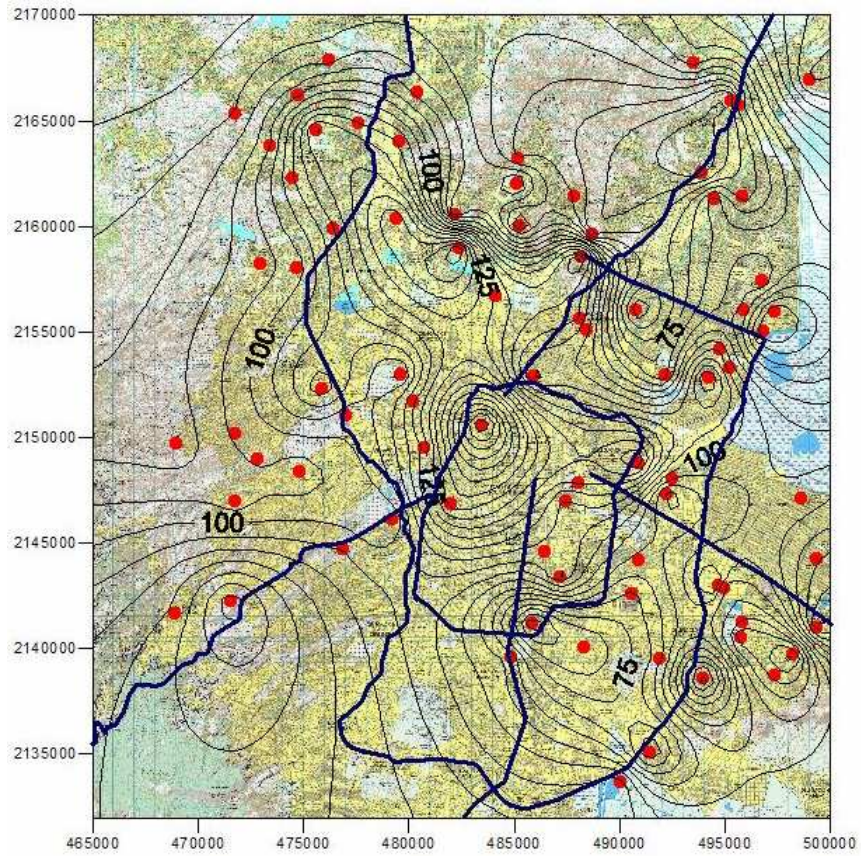


Distribución de Rb.

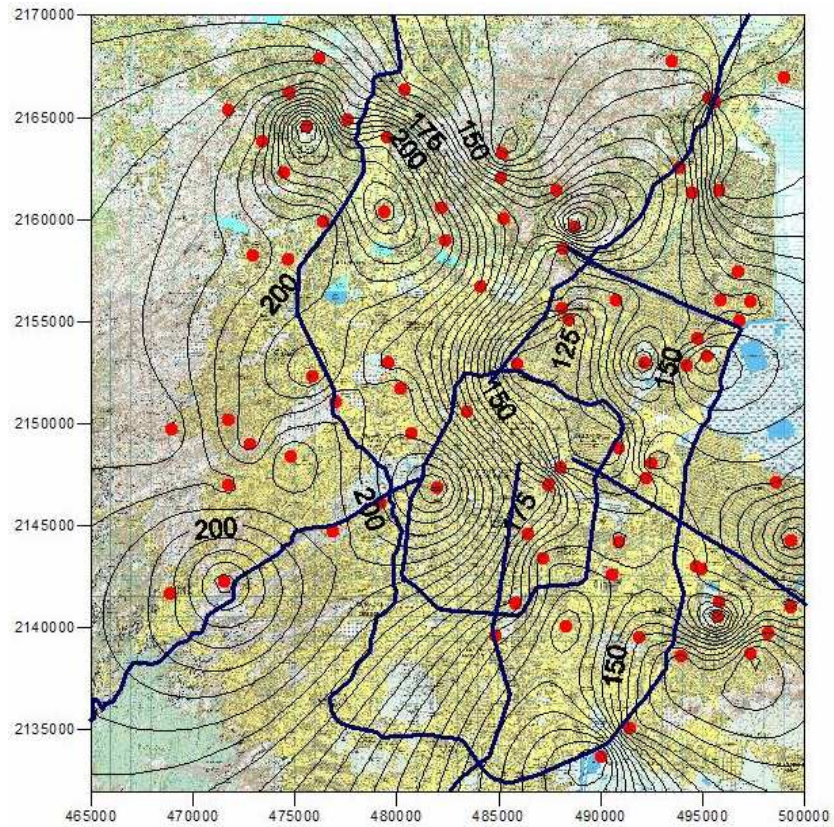




Distribución de V.



Distribución de Zr.



## Método de Interpolación Kriging

Es un método de interpolación en el cual utiliza variogramas, uno con los datos que se van a interpolar (variograma experimental) y otro con un modelo hipotético, Web 5. El variograma se obtiene de la varianza de los puntos con respecto a cada punto y graficado contra la distancia (h) entre cada punto, Figura A.

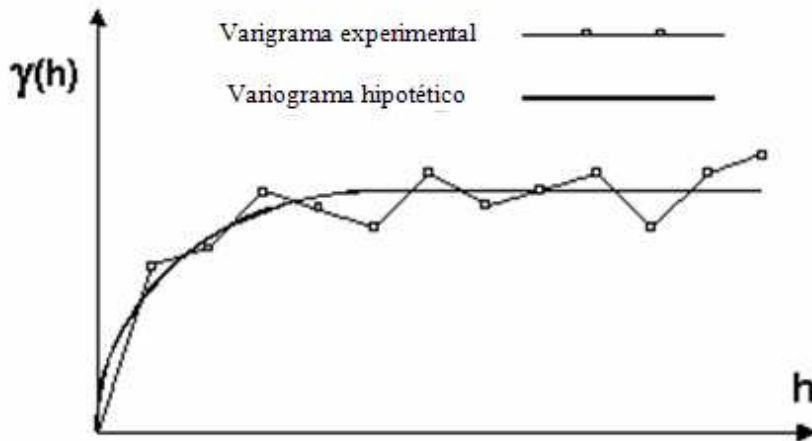


Figura A. Variograma (Modificado de Web 5)

La figura A demuestra que puntos cercanos entre sí, tienen valores similares. Una vez que el variograma hipotético es construido con base a un modelo matemático, éste es usado para calcular los pesos usados en el Kriging. La ecuación básica usada en el Kriging es:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n W_i f_i$$

Donde n es el número de puntos del conjunto de datos,  $f_i$  el valor de cada punto y  $W_i$  el peso asignado a cada punto.