



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Concentración de minerales ferrimagnéticos
en polvos urbanos de diferentes corredores
de transporte de la Ciudad de México:
Contaminantes, estrategias y movilidad.

T E S I S

Que para obtener el título de:

Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A:

Jessica Patricia Pelcastre Sicardo

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Avtandil Gogichaishvili

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Índice general

1. Introducción	11
2. Generalidades del campo magnético terrestre	13
3. Parámetros magnéticos	19
3.1. Magnetización	19
3.1.1. La naturaleza de la magnetización remanente	21
3.1.1.1. Magnetización Remanente Natural	21
3.1.1.2. Magnetización Termorremanente	22
3.1.1.3. Magnetización Remanente Detrítica	22
3.1.1.4. Magnetización Remanente Viscosa	24
3.1.1.5. Magnetización Remanente Isotermal	25
3.1.1.6. Magnetización Remanente Anhisterética	25
3.2. Susceptibilidad Magnética	26
3.2.1. Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia	26
3.2.2. Cociente S	27
3.2.3. MRA/MRIS	27
4. Mineralogía magnética	29
4.1. Clasificación de minerales magnéticos	29
4.1.1. Dominios magnéticos	33
4.1.2. Magnetita	34
4.1.3. Titanomagnetita	34
4.1.4. Hematita	36

4.1.5. Goetita	37
4.2. Diagrama ternario	38
5. Magnetismo Ambiental	40
5.1. Aplicaciones de Magnetismo Ambiental a estudios de contaminación urbana	41
5.1.1. Estudios en el extranjero	42
5.1.2. Estudios en México	43
6. Zona de estudio y adquisición de muestras	46
6.1. Descripción de la zona de estudio	46
6.2. Diseño de muestreo	47
6.3. Vialidades	49
7. Experimentos de laboratorio	53
7.1. Instrumentación empleada	53
7.2. Preparación de muestras	60
7.3. Experimentos de susceptibilidad magnética en función de la temperatura . .	61
7.4. Mediciones de Susceptibilidad Magnética a tres frecuencias	62
7.5. Mediciones de MRN	64
7.6. Mediciones de MRA	65
7.7. Adquisición de curvas de Magnetización Remanente Isotermal	66
8. Tratamiento de datos y resultados	68
8.1. Determinación de los principales portadores magnéticos mediante curvas κ -T	71
8.2. Susceptibilidad Magnética Específica.	77
8.3. Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia	81
8.4. Magnetización Remanente (Natural, Anhisterética e Isotermal)	93
8.5. Curvas de adquisición de MRI y MRA	102
8.6. Cociente S_{radio} (S_{-200})	104
8.7. Cociente MRA/MRIS	110
8.8. Comparación entre parámetros magnéticos de los diferentes corredores de transporte	115

9. Conclusiones	121
Referencias	126
A. Valores de medición del instrumento	127
A. Valores de medición normalizados	153
B. Resumen de parámetros magnéticos	163

Agradecimientos

A mi familia, especialmente a mis padres, abuelitos y Tanny, por ser mi fuente de motivación y fuerza. Mamá, gracias por ser mi mayor ejemplo de independencia, fortaleza y temple. Papá, gracias por el cariño y apoyo incondicional que nunca te has negado a brindarme. Tanny, gracias por escuchar todas mis locuras y brindarme opiniones tan sinceras. Abuelita, gracias por todo el amor de madre con el que me has llenado el corazón a diario. Y finalmente, 'mi amó' gracias por tanta exigencia y disciplina, pero sobre todo gracias por jamás soltar mi mano desde el momento en que nací, esto va especialmente para ti.

A David, por demostrarme que las segundas oportunidades pueden tener tesoros ocultos. Gracias por mantenerte al pie del cañón apoyando todas mis decisiones, aunque parecieran una locura. Gracias por siempre decir lo que necesito escuchar, por más duro que esto sea. Gracias por no darte por vencido jamás y encontrar siempre la manera en la que todo fluye con normalidad. Me has inspirado a ser mejor cada día y a no dejar de luchar por mis sueños a pesar de lo difícil que sea el camino. Amor, por sobre todas las cosas, gracias por trabajar a mi lado en la construcción de nuestras metas y demostrarme desde el primer segundo el significado de amar.

Agradezco al Dr. Avto Gogichaishvili, por la paciencia y la buena disposición que siempre tuvo para escucharme, leerme y aconsejarme. De la misma manera, agradezco al Dr. Francisco Bautista por permitirme trabajar con la base de datos del proyecto SECITI e invitarme a trabajar en el mismo. Quiero hacer un agradecimiento especial al Dr. Rubén Cejudo, quien me ha apoyado en cada paso de este camino, brindándome su consejo académico, orientación y conocimiento. Rubén, gracias sobre todo por tu amistad. A mis sinodales, gracias por dedicarle tiempo a la lectura y corrección de este proyecto, pese a la carga de trabajo que se les presentó estos meses, de verdad, muchas gracias.

Agradezco al proyecto número SECITI/051/2016 y titulado 'Sistema de monitoreo de la contaminación por metales pesados en polvos urbanos de la Ciudad de México', de la Secretaría de Ciencias, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México, por el apoyo económico que recibí para la elaboración del presente proyecto de tesis.

Gracias a cada uno de los profesores con quienes tuve el placer de formarme, su calidad profesional y humana ha sido parte de cada uno de mis pasos. Especialmente, quiero agradecer al Dr. Priyadarsi Debajyoti Roy por transmitir el conocimiento de manera tan especial, logrando que quienes hemos tenido el honor de estar en sus clases, salgamos de ellas inspirados por un profundo amor a la ciencia.

A mis amigos. 'Lou Fie's', sin ustedes nada hubiera sido lo mismo. Gracias por resolver mis dudas, por la compañía, las risas, las comidas, las caminatas, los enojos, las prácticas y cada instante de vida que hemos compartido. Gus, sin ti simplemente nunca hubiera elegido este camino, gracias por tener tanta fe en mi a lo largo de, casi, 7 años. Lau, gracias por estar para mí en absolutamente todos los momentos de mi vida y borrar con risas los instantes más tristes.

Agradezco a todos los miembros del Programa de Investigación en Cambio Climático de la UNAM, en especial al Dr. José Clemente Rueda, por permitirme trabajar paralelamente en el desarrollo de esta tesis y contribuir en más de un sentido, en mi vida académica. Gracias a Glo, Rubén, Fran, Vale, Lily, Pam, Dany, Sarah, Olivia, Lalo y Clau por ser ahora parte de mi familia y apoyarme de tantas maneras.

Agradezco el apoyo profesional y personal de Naomi Ramos. Nao, gracias por el apoyo en este proceso de reencuentro conmigo misma, por escucharme y ayudarme a enfrentar la parálisis en la que me sumergí hace escasos meses y por arreglar la "maraña" que llevaba cargando. He aprendido mucho en este proceso y has sido una pieza fundamental en él. De corazón, muchas gracias Nao.

Y finalmente, gracias a ti Jess, por que a pesar de que los últimos meses han sido terriblemente complicados has logrado poner punto final a este proyecto y retomar el camino que habías perdido hace tiempo. Dejo esta nota para ti, para que no olvides que vivir es todo lo que necesitas para ser feliz y que no hay objetivo imposible de lograr. Ten siempre presente la certeza más grande: 'Las alas de la mariposa fueron hechas para volar'.

Resumen

El análisis de propiedades magnéticas de polvos, hojas y suelos urbanos ha sido de gran utilidad en los últimos años debido a su efectividad en la identificación de sitios contaminados, especialmente en zonas urbanas. En este trabajo se hace uso de dichas propiedades para mostrar la utilidad de la concentración de minerales ferrimagnéticos como indicador ambiental en la Ciudad de México. Esta concentración es relacionada con el tipo de transporte y tránsito en distintas vialidades de la ciudad para determinar si este es un factor de impacto en la emisión de partículas contaminantes y evaluar de esta manera la efectividad de las medidas instauradas por las autoridades gubernamentales como un intento por mejorar la calidad del aire de esta urbe.

Lo anterior se lleva a cabo mediante el análisis de parámetros magnéticos en muestras de polvo urbano de cinco vialidades: Calzada de Tlalpan, Avenida Insurgentes, Eje 2 Oriente, Circuito Bicentenario y Corredor cero Emisiones de Eje Central. Los parámetros analizados en dichos corredores de transporte fueron, la Susceptibilidad Magnética Específica, el Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia, mediciones de MRN, MRA y MRI, Cociente S y Cociente MRA/MRIS; además del análisis de curvas termomagnéticas para la identificación de los principales portadores magnéticos de las muestras.

A partir de la metodología propuesta, se detectó la presencia de Magnetita, Titanomagnetita y Goethita en las vialidades analizadas. De acuerdo con los valores obtenidos mediante el cociente S_{200} , Avenida Insurgentes, Eje 2 Oriente, Corredor Cero Emisiones de Eje Central y Circuito Bicentenario, presentan una alta concentración de minerales ferrimagnéticos, siendo Circuito Bicentenario la vialidad con mayor concentración de estos. Por otro lado, Calzada de Tlalpan, es la vialidad cuyos parámetros magnéticos coinciden entre sí al indicar bajas concentraciones de minerales ferrimagnéticos. Lo anterior, sugiere que el tipo de transporte

que circula por cada vialidad no necesariamente produce un impacto real en la cantidad de partículas ferrimagnéticas emitidas al ambiente.

Abstract

The analysis of magnetic properties in urban dust, leaves and soils has been very useful during the last decade due to its effectiveness in the identification of polluted areas sites, especially in urban areas. In present survey, these properties are used to estimate the usefulness of the concentration of ferrimagnetic minerals as an environmental indicator in Mexico City Metropolitan Area. The crucial issue is whether this concentration is related to the type of vehicles and different type of transport routes within the city in order to evaluate the strategy implanted by the authorities.

This present investigation is carried out through the analysis of magnetic parameters in urban dust samples along five most representative routes: Calzada de Tlalpan, Avenida Insurgentes, Eje 2 Oriente, Circuito Bicentenario and Corredor cero Emisiones de Eje Central. The parameters analyzed in these transport corridors were, the Specific Magnetic Susceptibility, the Percentage of Magnetic Susceptibility depending on the frequency, measurements of Natural Remanent Magnetization (NRM), Anysteretic Remanent Magnetization (ARM) and Isothermal Remanent Magnetization (IRM). So called S ratio and and ARM/ SIRM factors together with continuous susceptibility curves were also used to precise identification of the main magnetic carriers in the samples.

Based on rock-magnetic methodology, the presence of Magnetite, Titanomagnetite and Goethite was detected in the analyzed samples. According to the values obtained through the S200 ratio and thermomagnetic curves. Avenida Insurgentes, Eje 2 Oriente, Corredor Cero Emisiones de Eje Central and Circuito Bicentenario, present a high concentration of ferrimagnetic minerals, being the Bicentennial Circuit the road with the highest concentration. On the other hand, Calzada de Tlalpan, indicate relatively low concentrations of ferrimagnetic minerals. The above, suggests that the type of transport in Mexico City urban

area does not necessarily produce a real impact on the amount of ferrimagnetic particles emitted to the environment.

Capítulo 1

Introducción

En los últimos años el análisis de propiedades magnéticas en polvos urbanos se ha convertido en un método cada vez más aceptado en la identificación de zonas contaminadas, debido a que su implementación no destruye la muestra, es más rápida y menos costosa que los análisis químicos convencionales (Lu *et al.*, 2007). Su utilidad se ha observado principalmente en estudios de polvo urbano, ya que pueden poseer partículas ferrimagnéticas contaminantes, mismas que permiten identificar las diferentes fuentes de origen de los polvos (Sánchez *et al.*, 2016).

El polvo urbano asentado sobre distintas vialidades de zonas urbanas y sus alrededores está compuesto por partículas generadas a partir de procesos naturales, como erosión de suelo o rocas, ceniza producida por actividad volcánica y polen que se transporta mediante el viento (Sánchez *et al.*, 2016). Sin embargo, este tipo de partículas componen solo una parte del material particulado, pues la principal fuente de emisión de las mismas es atribuida a los gases producidos por el tránsito vehicular. Estas últimas, contienen elementos potencialmente tóxicos y partículas de minerales magnéticos cuyo tamaño va de los 10 a menos de 2.5 micrómetros, una característica que las hace potencialmente peligrosas debido a su biodisponibilidad para el sistema respiratorio (Cejudo *et al.*, 2015a)

Pese a que la ciudad de México cuenta con un sistema de monitoreo de partículas suspendidas, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, dióxido de azufre y ozono, existe muy poca información sobre el polvo urbano acumulado en las vialidades, mismo que puede contener minerales ferrimagnéticos capaces de absorber iones de metales pesados; una característica

que permite proponer a su concentración como un indicador ambiental.

En años recientes, el gobierno de la Ciudad de México ha implementado una serie de medidas como, restricciones a la movilidad de vehículos particulares, modernización de algunas unidades de transporte público y la modificación del tipo de transporte en vialidades específicas. Estas medidas tienen como fin, reducir la cantidad de partículas contaminantes producidas por el parque vehicular. Sin embargo, no se ha creado algún indicador que permita evaluar su impacto en la concentración de minerales ferrimagnéticos presentes en el material fino de las vialidades. Por esta razón, en este trabajo se pretende proponer la concentración de minerales ferrimagnéticos presente en el polvo urbano de distintos corredores de transporte, como indicador ambiental de la Ciudad de México, mediante el análisis de parámetros magnéticos. Y con base en lo anterior, evaluar si el tipo de tránsito y transporte vial tiene un impacto real en la emisión de dichas partículas contaminantes.

Primeramente, se presentarán los conceptos teóricos sobre los cuales este trabajo está sustentado, mismos que comienzan en las generalidades del campo magnético terrestre y se definen hasta llegar al Magnetismo Ambiental. Posteriormente, se describirá el proceso de adquisición de muestras, así como la metodología empleada para llevar a cabo las mediciones de susceptibilidad magnética volumétrica y específica, magnetización remanente natural, anhisterética, isotermal y susceptibilidad magnética dependiente de la temperatura. A partir de lo anterior, se obtendrá la concentración de minerales ferrimagnéticos en el polvo de las vialidades estudiadas, así como los portadores magnéticos presentes en las mismas. De esta manera, se evaluará la relación entre estas concentraciones y los diferentes tipos de tránsito y transporte de las vialidades para poder concluir si este último tiene un impacto real en la emisión de partículas magnéticas contaminantes.

Capítulo 2

Generalidades del campo magnético terrestre

Nuestro planeta se presenta como un sistema dinámico caracterizado por diversos elementos, dentro de los cuales se encuentra el Campo Magnético Terrestre. Este campo se encuentra alrededor de la Tierra (Lanza y Meloni, 2006) y es generado por las corrientes de convección presentes en su núcleo líquido externo, el cual está compuesto principalmente por hierro y níquel. La fuente de la energía que produce estas corrientes de convección aún no se determina con certeza, sin embargo, se cree que es originada, por un lado, por el enfriamiento del núcleo y por el otro por la "flotabilidad" (Telford *et al.*, 1990) del núcleo líquido externo. En este fluido conductor los movimientos están controlados por la flotabilidad del líquido, el giro de la Tierra sobre su eje y por la interacción del fluido conductor con el campo magnético, estos movimientos actúan como un dinamo que permanece y se perturba a sí mismo y que da lugar a un gran campo magnético (Tauxe, 2005).

Las mediciones magnéticas en la superficie terrestre presentan la contribución de distintas fuentes (Lanza y Meloni, 2006):

- El campo magnético principal, generado en el núcleo líquido de la Tierra por el geodinamo.
- El campo magnético de la corteza, generado por las rocas magnetizadas presentes en la corteza terrestre.

- El campo magnético externo, generado por las corrientes eléctricas que tienen lugar en la ionosfera y magnetósfera, las cuales son debidas a la interacción de la radiación electromagnética solar y el viento solar con el campo magnético de la Tierra.
- El campo magnético que se genera a partir del proceso de inducción electromagnética debido a las corrientes eléctricas inducidas, en la corteza y el manto superior, por las variaciones en tiempo del campo magnético externo.

A diferencia del campo gravimétrico de la Tierra, (prácticamente invariante en el tiempo) el campo magnético terrestre presenta variaciones tanto en dirección como en intensidad en escalas de tiempo que pueden ir de milisegundos hasta milenios (Blakely, 1996).

El primero en hacer un análisis cuantitativo del campo geomagnético fue Carl F. Gauss, quien, mediante armónicos esféricos, concluyó que la contribución de fuentes externas a dicho campo era nula. Sin embargo, los análisis de armónicos esféricos del campo magnético observado, que se han realizado en la actualidad, concluyen que, si bien, la mayor contribución proviene de fuentes que se encuentran dentro de la Tierra (internas) (Telford *et al.*, 1990); las fuentes externas también contribuyen con decenas de nanoteslas al campo magnético medido en la superficie terrestre, y están asociadas a variaciones considerables del mismo, en tiempo y espacio (Blakely, 1996).

Por otro lado, se sabe que el campo magnético principal, originado en el interior de la Tierra es aproximadamente dipolar. Este campo interactúa con las salpicaduras de viento solar que llegan a la Tierra, y se suman a ellas las fuerzas de marea y los efectos termales, que al generar una interacción conjunta dan lugar al campo magnético externo (Blakely, 1996).

Para conocer la evolución del campo magnético terrestre se ha hecho uso de las "huellas" magnéticas que permanecen en las rocas, denominadas registros paleomagnéticos. A partir del estudio de estos registros, se ha logrado identificar que el campo magnético de la Tierra siempre se ha posicionado prácticamente a lo largo del eje de rotación de la Tierra, lo cual trae la importante implicación de que el movimiento convectivo está acoplado al giro de la Tierra (Telford *et al.*, 1990).

Para representar al vector de campo magnético de la Tierra se usa un marco de referencia definido con respecto a los puntos de observación en la superficie de la Tierra. Esta repre-

sentación puede llevarse a cabo de dos maneras. En la primera, el vector puede describirse a través de tres componentes ortogonales, las cuales se muestran en un sistema de coordenadas cartesianas que presentan valores positivos hacia el norte, este y en dirección vertical hacia el centro de la Tierra. La segunda manera, se representa a través de la magnitud de la componente horizontal H , la dirección angular (hacia el este) de la componente horizontal a partir del norte geográfico (denominada *Declinación* D) y una componente vertical hacia abajo. A la primera representación se le conoce como la representación XYZ y a la segunda como la representación de componentes HDZ (Blakely, 1996; Campbell, 2003).

Mediante geometría es posible obtener equivalencias entre ambas formas de representación como se muestra a continuación (Campbell, 2003):

$$X = H \cos D \quad (2.1)$$

$$Y = H \sin D \quad (2.2)$$

Mientras que la intensidad de campo total F o T esta dada por (Campbell, 2003):

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{H^2 + Z^2} \quad (2.3)$$

Al ángulo que forma el campo total con el plano horizontal se le denomina, *Inclinación* I y esta dado por (Campbell, 2003):

$$\frac{Z}{H} = \tan I \quad (2.4)$$

Al observar la figura 2.1 se puede observar que, al emplear las relaciones angulares se puede realizar una conversión de, X y Y a H y D como sigue (Campbell, 2003):

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2}; D = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (2.5)$$

En ocasiones, el ángulo de Declinación D (que se encuentra en grados) se expresa en intensidad de campo dirigido hacia el Este, por lo que sus unidades cambian a (nT). Esta conversión se obtiene mediante (Campbell, 2003):

$$D(nT) = H \tan(D) \quad (2.6)$$

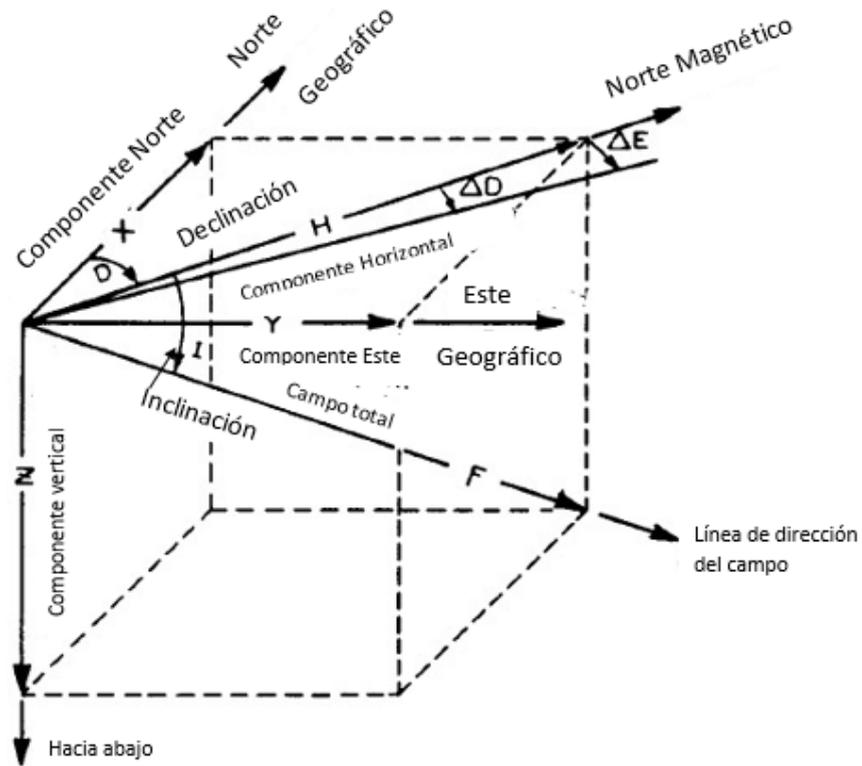


Figura 2.1: Elementos del campo geomagnético. Modificado de: (Campbell, 2003)

Los mapas de contorno que representan estos elementos son llamados *mapas isomagnéticos*, los cuales se dividen entre categorías. La primera corresponde a los mapas *isodinámicos*, los cuales representan la misma intensidad de campo magnético. La segunda categoría son los mapas *isoclinales*, que muestran contornos de igual inclinación. Y finalmente los mapas *isogónicos*, mapas en los que se presentan contornos de igual declinación (Blakely, 1996).

Es importante mostrar la representación de coordenadas geomagnéticas, las cuales se definen usando colatitudes y longitudes en el marco de un dipolo geomagnético, en el que es posible identificar a los polos geomagnéticos norte y sur, como puntos en la superficie de la Tierra en donde el eje de un dipolo central ideal intersecta a la superficie. De manera similar, es posible definir una línea imaginaria en la superficie de la Tierra que represente la intersección entre el plano ortogonal del centro de la Tierra y el del dipolo central. Esta línea se denomina ecuador geomagnético (Figura 2.2) (Lanza y Meloni, 2006):

El campo magnético de la Tierra ha invertido en su polaridad varias veces. A través

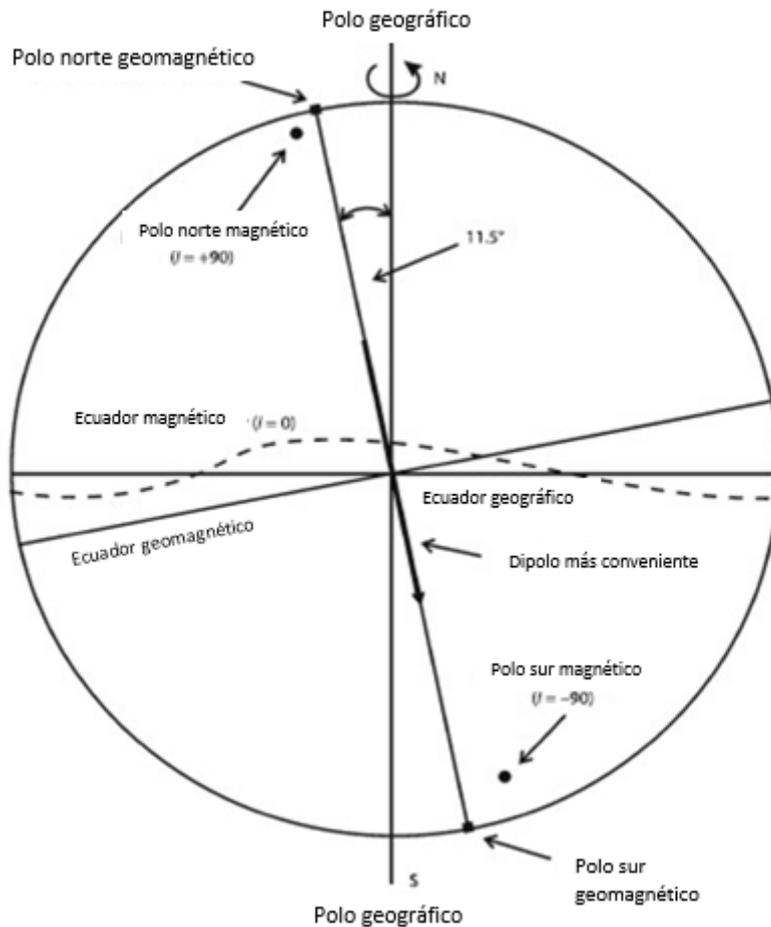


Figura 2.2: Representación de la Tierra a través de sus polos geográficos y geomagnéticos. Imagen tomada de: (Lanza y Meloni, 2006)

de largas observaciones del campo magnético terrestre, se han podido identificar lentas variaciones del mismo a lo largo del tiempo. Estas variaciones se muestran en los distintos elementos del campo geomagnético como la inclinación que ha presentado una variación de 10° (75° a 65°) en un periodo de cuatrocientos años, o la declinación que ha ido de $10^\circ E$ a $25^\circ W$ y después a $10^\circ W$ en el mismo periodo. Estas variaciones en periodos largos de tiempo surgen principalmente en el núcleo líquido externo de la Tierra, debido a cambios en las corrientes de convección (Telford *et al.*, 1990), y se denominan *variaciones seculares* (Blakely, 1996).

Las variaciones en periodos cortos de tiempo, anuales o menores, son causadas por fuentes externas, tales como corrientes eléctricas en la ionosfera. Estas variaciones temporales se manifiestan con un comportamiento periódico, como la variación diurna controlada por la

acción del viento solar en corrientes de la ionosfera (Blakely, 1996).

La variación diurna se presenta como uno de los efectos de la contribución del campo magnético externo, misma que es asociada con corrientes eléctricas en las capas ionizadas en la parte alta de la atmósfera. Además de la variación diurna otros efectos de la contribución del campo magnético externo son las tormentas magnéticas; definidas como perturbaciones transitorias con amplitudes superiores a 1 [T]. En regiones polares, estas últimas, tienden a ser mayores y se asocian con las auroras boreales (Telford *et al.*, 1990).

Capítulo 3

Parámetros magnéticos

Las mediciones de parámetros magnéticos, en una muestra, son relativamente rápidas y fáciles de realizar, en especial si son comparadas, por ejemplo, con técnicas geoquímicas. Debido a estas características, el proceso de análisis de parámetros magnéticos es de gran utilidad en la reconstrucción de variaciones climáticas y ambientales (Tauxe, 2005).

3.1. Magnetización

Dentro del análisis de parámetros magnéticos uno de los conceptos más importantes es el de *Magnetización*. Para poder definirlo, es necesario partir de la inexistencia de cargas magnéticas aisladas, y por consiguiente, la inexistencia de monopolos magnéticos. Lo anterior se puede traducir en que la unidad de carga magnética más pequeña, es el dipolo magnético.

Con base en el dipolo magnético es posible presentar el concepto de momento magnético dipolar (Momento magnético M), el cual debe entenderse como la fuerza que un dipolo magnético puede ejercer sobre una corriente eléctrica. El momento magnético puede ser definido a partir de un par de cargas magnéticas (fig.3.1a) o a partir de un anillo de corriente eléctrica (fig.3.1b). Si se toma el caso del par de cargas magnéticas, la magnitud de la carga se definirá como m y la magnitud del vector de distancia entre ambas cargas será l . Por consiguiente el momento magnético, en este caso, estará definido como (Butler, 2004):

$$M = ml \tag{3.1}$$

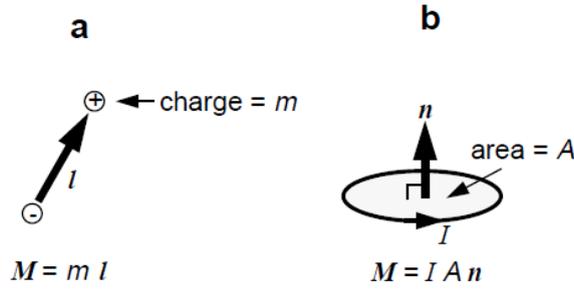


Figura 3.1: a) Dipolo magnético construido a partir de un par de cargas magnéticas. b) Momento magnético a partir de un anillo de corriente eléctrica. Fuente: (Butler, 2004)

En el caso de un anillo, con área A , que lleva corriente eléctrica I , el momento magnético está definido como (Butler, 2004):

$$M = I A n \quad (3.2)$$

Donde n es el vector perpendicular al plano del anillo y es paralelo a la dirección de M (dirección que cumple con la regla de la mano derecha). Un momento magnético con libre rotación se alineará con el campo magnético.

De esta manera, la intensidad magnética o *Magnetización* (J) [A/m] de un material es el momento dipolar magnético neto por unidad de volumen. Para calcular la magnetización en un volumen determinado, la suma vectorial de momentos magnéticos se divide entre el volumen que encierra esos momentos magnéticos, como se muestra a continuación (Butler, 2004):

$$J = \frac{\sum_i M_i}{\text{volumen}} \quad (3.3)$$

Donde M_i representa cada momento magnético.

De manera general, existen dos tipos de magnetización: la magnetización inducida y la magnetización remanente. Cuando un material está expuesto a un campo magnético H , este adquiere una magnetización inducida (J_i). Estas cantidades se relacionan a través de la *Susceptibilidad magnética*, mediante la siguiente expresión:

$$J_i = \kappa H \quad (3.4)$$

La expresión anterior hace referencia a una susceptibilidad escalar, lo cual implica una magnetización paralela al campo magnético H . Sin embargo, esto no sucede siempre, ya que algunos materiales presentan anisotropía magnética, característica que genera una magnetización no paralela a H . Para una sustancia anisotrópica un campo magnético aplicado en dirección X inducirá, en general, una magnetización, no sólo en dirección X , sino también en Y y Z , de igual forma, para estas sustancias la susceptibilidad magnética se expresa como un tensor, κ , que requiere una matriz cuadrada de 3×3 para su completa descripción (Butler, 2004).

Por otro lado, la magnetización remanente (J_r), puede definirse de manera simple como el registro de los campos magnéticos que han actuado sobre el material en el pasado (Butler, 2004).

3.1.1. La naturaleza de la magnetización remanente

Cuando un material se encuentra en presencia de un campo magnético, presentará una magnetización inducida (Evans y Heller, 2003). De manera adicional a esta magnetización inducida, el material presentará también una *magnetización remanente*. Esta magnetización es un registro de los campos magnéticos antiguos que han actuado sobre el material, de esta manera, materiales como las rocas pueden adquirir y mantener una magnetización remanente que registre la dirección del campo geomagnético presente en la Tierra durante la formación de dichas rocas (Butler, 2004). De acuerdo a las características y origen de la misma, la Magnetización Remanente se clasifica de la siguiente manera:

3.1.1.1. Magnetización Remanente Natural

La *Magnetización Remanente Natural* (MRN) es aquella presente en una roca o muestra, previa a su tratamiento en laboratorio; y depende del campo geomagnético y procesos geológicos ocurridos durante la formación e historia de la roca. Esta magnetización presenta más de una componente; es decir, por un lado se encuentra la componente adquirida durante la formación de la roca (MRN primaria) que es el objeto de interés en paleomagnetismo, y por otro, la componente que la roca adquiere después de su formación (MRN secundaria) misma que suele enmascarar a la componente primaria (Butler, 2004).

$$MRN = MRN_{primaria} + MRN_{secundaria} \quad (3.5)$$

La componente primaria de la MRN es capaz de registrar el campo geomagnético presente durante la formación de la roca, y bajo condiciones favorables, mantener ese registro a través del tiempo geológico (Butler, 2004).

Por otro lado, la componente secundaria de la Magnetización Remanente Natural es generada a partir de cambios químicos o de una larga exposición al campo geomagnético presente en la Tierra después de la formación de la roca (Butler, 2004).

3.1.1.2. Magnetización Termorremanente

La Magnetización Termorremanente (MRT), es un tipo de MRN generada a partir del enfriamiento de un material que se encuentra a temperaturas superiores a la Temperatura de Curie (T_C), mientras es expuesto a un campo magnético (Butler, 2004).

Este tipo de Magnetización Remanente permite conocer el proceso por el cual el material adquirió cierta magnetización y resulta de gran utilidad para obtener registros de cambios relativos en la intensidad del campo al que ha sido expuesto (Evans y Heller, 2003; Tauxe, 2005).

3.1.1.3. Magnetización Remanente Detrítica

Este tipo de magnetización es adquirida durante el depósito y litificación de rocas sedimentarias, características que la hacen más complicada que otras magnetizaciones, como la termorremanente, debido a la cantidad de procesos involucrados en la formación de las mismas. Como primer factor, está el alineamiento físico que ocurre durante el depósito, fenómeno al cual hace referencia la *Magnetización Remanente Detrítica de depósito*. A los procesos de alineación que tienen lugar después del depósito, pero antes de la consolidación, se les hará referencia a partir de la *Magnetización Remanente Detrítica postdeposicional (MRDp)*, la cual ocurre en presencia de alto contenido de agua y bloques de sedimento de entre 10 y 20 cm. La combinación de los procesos de magnetización deposicionales y postdeposicionales dan origen a la *Magnetización Remanente Detrítica (MRD)*. (Butler, 2004).

- MRD de depósito

En el modelo clásico de adquisición de MRD se considera que únicamente las partículas ferromagnéticas se ven afectadas por el campo magnético, de esta manera, son dichas partículas las que presentan alineación. Considerando granos ferromagnéticos esféricos con un momento magnético m , inmersos en un fluido con viscosidad η en presencia de un campo magnético H , se puede establecer que el ángulo existente entre m y H está dado por θ como sigue (Butler, 2004):

$$\Omega \left[\frac{d^2\theta}{dt^2} \right] + \beta \left[\frac{d\theta}{dt} \right] + mH \sin \theta = 0 \quad (3.6)$$

El primer término de la ecuación 3.6, describe la resistencia inercial a la aceleración angular, Ω es el momento de inercia de la partícula, dado por la ecuación 3.7, en la que ρ es la densidad de la partícula y d el diámetro del grano. El segundo término de la ecuación antes mencionada describe el arrastre viscoso entre la partícula y el fluido a su alrededor, este arrastre resiste la rotación de la partícula y depende de la tasa de rotación con β dada por la ecuación 3.8. Finalmente, el último término de la ecuación 3.6 es la alineación del par del campo magnético (Butler, 2004):

$$\Omega = \left[\frac{\pi d^5 \rho}{60} \right] \quad (3.7)$$

$$\beta = \pi d^3 \eta \quad (3.8)$$

Ahora bien, para el caso de partículas ferromagnéticas el primer término de la ecuación 3.6 es despreciable, en este sentido, el grano rota rápidamente y se aproxima a valores pequeños de θ para los cuales $\sin \theta = \theta$, por consiguiente la ecuación 3.6 se reduce a:

$$\frac{d\theta}{dt} = - \left(\frac{mH\theta}{\pi d^3 \eta} \right) \quad (3.9)$$

Cuya solución describirá cómo el ángulo θ decrece a partir de un ángulo inicial θ_0 , un proceso de alineación descrito por:

$$\theta(t) = \theta_0 \exp \left(\frac{-t}{t_0} \right) \quad (3.10)$$

Donde

$$t_0 = \left(\frac{\pi d^3 \eta}{mH} \right) \quad (3.11)$$

De esta manera se puede deducir que el momento magnético de una partícula esférica está dado por:

$$m = \frac{\pi d^3 J}{6} \quad (3.12)$$

Donde J corresponde a la Magnetización. El modelo descrito implica una alineación rápida y completa de las partículas ferromagnéticas en presencia del campo geomagnético durante el proceso de depósito.

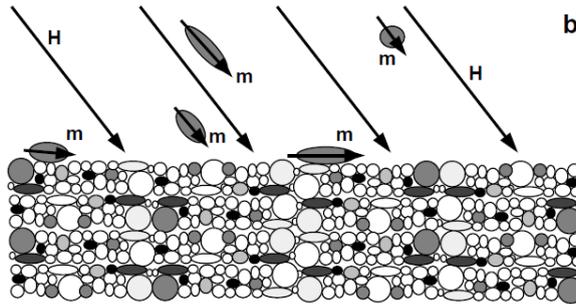


Figura 3.2: Alineación de granos ferromagnéticos en presencia de un campo magnético H. Los granos elongados con momento magnético m a lo largo de el eje horizontal tienden a rotar hacia un plano horizontal, generando menor inclinación de MRD. Fuente: (Butler, 2004)

- Alineación posterior al depósito

Debido a la anisotropía, el momento magnético de granos ferromagnéticos elongados yace a lo largo del eje más extenso de la partícula, sin embargo la rotación gravitacional genera que las partículas roten hacia la horizontal (fig.3.2). En este sentido, la conclusión es que el proceso de magnetización se debe, en parte, a la Magnetización Remanente Detrítica postdeposicional (MRDp). En algunos sedimentos, este tipo de magnetización es el único mecanismo plausible de MRD, por lo que un análisis de los procesos de MRDp es esencial para el entendimiento del magnetismo remanente detrítico (Butler, 2004).

3.1.1.4. Magnetización Remanente Viscosa

Este tipo de magnetización es adquirida por la muestra de manera gradual al encontrarse en presencia de un campo magnético débil. De manera natural, la *Magnetización Remanente*

Viscosa MRV es producto de la acción del campo geomagnético después de la formación de la roca, generalmente esta magnetización se trata como ruido (Butler, 2004). La MRV cambia en función del tiempo, debido a que el tiempo de relajación¹ es función de la temperatura la Magnetización Remanente Viscosa crecerá a mayor velocidad en temperaturas elevadas (Tauxe, 2005).

3.1.1.5. Magnetización Remanente Isotermal

La Magnetización Remanente Isotermal (MRI) es fácilmente producida en laboratorio, y se emplea frecuentemente en la caracterización de minerales ferromagnéticos en rocas (Lanza y Meloni, 2006). El material, adquiere una Magnetización Remanente Isotermal a temperatura constante y bajo la acción de un campo magnético externo de gran intensidad (Soler, 2007). Esta magnetización, también puede ser adquirida de manera natural debido a la caída de rayos durante las tormentas eléctricas. Estas corrientes eléctricas, del orden de 100 [A], fluyen por el suelo algunos milisegundos y generan un campo magnético muy intenso, provocando así que las rocas adquieran una MRI con dirección aleatoria y de gran intensidad (Lanza y Meloni, 2006). El valor máximo de MRI que se puede adquirir, es conocido como *Magnetización Remanente Isotermal de Saturación* (Tauxe, 2005).

3.1.1.6. Magnetización Remanente Anhisterética

La *Magnetización Remanente Anhisterética (MRA)* se presenta cuando una muestra está siendo sometida a un campo magnético alterno que decrece de un valor máximo a cero, al mismo tiempo que es expuesta a un campo constante, adquiriendo así una remanencia paralela a la dirección de este último. La intensidad de la MRA dependerá del contenido de minerales ferromagnéticos en la muestra (Lanza y Meloni, 2006). Los granos ferromagnéticos capaces de portar Magnetización Remanente Anhisterética, son aquellos que poseen, a nivel microscópico, una *Fuerza Coercitiva*² por encima de la amplitud máxima del campo magnético alterno aplicado (Butler, 2004).

¹Tiempo requerido para que una cantidad decaiga a razón de $1/e$ (37%) de su valor inicial (Evans y Heller, 2003)

²Entiéndase como Fuerza Coercitiva al valor del campo magnético en el cual se mide una magnetización igual a cero.

3.2. Susceptibilidad Magnética

En principio, la *Susceptibilidad Magnética* puede definirse como el grado de facilidad con que un material puede magnetizarse al ser expuesto a un campo magnético. Matemáticamente, la Susceptibilidad Magnética (κ) está definida como la magnetización adquirida por el material por unidad de campo (Evans y Heller, 2003), es decir:

$$\kappa = J/H \quad (3.13)$$

En el Sistema Internacional, las unidades de magnetización y campo magnético son las mismas, [A/m], por lo que la susceptibilidad es una cantidad adimensional. En sentido estricto κ debe nombrarse como *Susceptibilidad Magnética Volumétrica*, de la cual se puede obtener la denominada *Susceptibilidad Magnética Específica*, a partir de la siguiente expresión, en donde ρ corresponde a la densidad del material (Evans y Heller, 2003):

$$\chi = \kappa/\rho [m^3/kg] \quad (3.14)$$

3.2.1. Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia

El Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia es uno de los parámetros magnéticos más importantes. Este parámetro se obtiene a partir de la medición de la susceptibilidad a alta y baja frecuencia (κ_{hf} y κ_{lf} respectivamente) generando la diferencia entre ellas como sigue (Evans y Heller, 2003):

$$\chi_{DF} \% = [(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})/\kappa_{lf}] * 100 \quad (3.15)$$

Este parámetro es de particular utilidad para detectar la presencia de minerales ferrimagnéticos muy finos, descritos como superparamagnéticos. Los óxidos de hierro, la magnetita, la titanomagnetita y la titanomaghemita son los minerales ferrimagnéticos dominantes en sedimentos, suelos y polvos (Dearing, 1999).

3.2.2. Cociente S

El propósito de este parámetro es proveer una medida relativa de la coercitividad de remanencia del material, entendiendo como coercitividad de remanencia a la intensidad del campo inverso que debe ser aplicado para reducir a cero después de haberlo llevado a la saturación magnética. Una alta coercitividad de remanencia permitirá identificar minerales antiferrimagnéticos en el caso contrario se podrán identificar minerales ferrimagnéticos. Para obtener el cociente S radio primero se debe llevar la muestra a la Magnetización Remanente Isotermal de Saturación, de manera ascendente, para posteriormente aplicar un campo inverso que generalmente tiene una intensidad de 0.3[T]. El cociente S radio se calculará dividiendo el valor de la magnetización remanente isotermal sometida al campo inverso entre el valor de la magnetización remanente isotermal de saturación (Evans y Heller, 2003). Los valores cercanos a 1 indicarán que la muestra está dominada por minerales ferrimagnéticos. Así mismo, el cociente S disminuye gradualmente conforme aumenta la concentración de minerales como la hematita o la goetita (Liu *et al.*, 2012) .

$$S_{-x} = MRI_{-x}/MRIS \quad (3.16)$$

3.2.3. MRA/MRIS

Este parámetro es utilizado como indicador de granulometría, específicamente para el caso de la magnetita. Las partículas pequeñas presentan valores mayores, debido a que adquieren una Magnetización Remanente con mayor facilidad, específicamente la Magnetización Remanente Anhisterética. Las muestras que contengan fracciones altas de partículas de un solo dominio (SD) y dominio pseudosimple (PSD) (Véase capítulo 4) presentarán un alto valor en este cociente (Evans y Heller, 2003). Lo anterior es debido a que los granos SD y PSD están caracterizados, principalmente, por la alineación paralela de todos sus momentos de giro, generando así una alta magnetización de igual magnitud que la Magnetización de Saturación (M_S). Esto implicará que para llevar la magnetización de esos granos a cero después de haberlos llevado a la M_S , se necesitará de gran intensidad de campo magnético, es decir, de alta coercitividad. Tomando en cuenta que al aumentar la coercitividad magnética del material su tamaño disminuye, se puede concluir que efectivamente las partículas con

dominio tipo SD y PSD presentan granulometría pequeña (Lanza y Meloni, 2006).

$$Cociente = \frac{ARM}{MRIS} \quad (3.17)$$

Capítulo 4

Mineralogía magnética

4.1. Clasificación de minerales magnéticos

Existen tres tipos fundamentales de propiedades magnéticas: Diamagnetismo, Paramagnetismo y Ferromagnetismo. Estas propiedades pueden observarse al monitorear el comportamiento de distintos materiales, cuando son sometidos a experimentos, en los que adquieren una magnetización J al aplicar un campo magnético H . Dichas propiedades obedecen a los momentos magnéticos atómicos, que son originados a partir del giro de los electrones presentes en los orbitales.

- Diamagnetismo

La aplicación de un campo magnético a un material altera el movimiento orbital de los electrones (Butler, 2004). Si todos los orbitales en una molécula están completos, los momentos magnéticos de los electrones se cancelan entre sí, y el momento total es cero. Estos materiales son llamados diamagnéticos y al estar en presencia de un campo magnético externo adquieren una magnetización inducida débil, en dirección opuesta al campo aplicado (Lanza y Meloni, 2006). La susceptibilidad magnética en un material diamagnético es negativa e independiente de la temperatura y presenta un valor típico aproximado de -1×10^{-6} , siendo el cuarzo un ejemplo de mineral diamagnético (Butler, 2004).

- Paramagnetismo

En el contexto del magnetismo ambiental, el paramagnetismo es más importante que

el diamagnetismo. Recordando el comportamiento de los electrones, se sabe que un electrón gira sobre su propio eje al mismo tiempo que gira alrededor del núcleo del átomo, estos procesos generan un momento de giro magnético aunado a un momento orbital magnético. En este sentido, el momento magnético total del átomo está dado por la suma vectorial de todos los momentos de los electrones. Si los momentos magnéticos orbitales y de giro están orientados de tal manera que se cancelan parcialmente, el átomo tendrá un momento magnético permanente, que lleva al paramagnetismo (Evans y Heller, 2003).

En los materiales paramagnéticos, los orbitales no están completos y en presencia de un campo magnético, este tipo de materiales adquieren una magnetización paralela al campo aplicado, con una susceptibilidad magnética positiva que se encuentra en un rango de entre 100 y 1000 ($\times 10^{-6}$) (Butler, 2004). En estos materiales, la magnetización decrece conforme la temperatura aumenta, es decir, la intensidad de la magnetización es inversamente proporcional a la temperatura. Una cantidad significativa de minerales paramagnéticos son de interés en estudios ambientales, sin embargo, es común que estos materiales generen mayor ruido que señal (Evans y Heller, 2003).

- Ferromagnetismo

Este tipo de materiales los átomos se encuentran tan juntos que algunos de los electrones de los orbitales se superponen y surge una fuerte interacción entre ellos. Esto es llamado acoplamiento de intercambio, este fenómeno se refiere a una alineación de todos los momentos magnéticos de los átomos, la cual da lugar a una fuerte magnetización. Esta configuración suele imaginarse como un arreglo regular de flechas, todas de la misma magnitud y paralelas (Evans y Heller, 2003).

Las fuerzas de interacción que alinean los momentos magnéticos de giro de los electrones actúan en distancias micrométricas formando lo que se conoce como *Dominios magnéticos*. Dentro de un dominio, los momentos de giro son mutuamente paralelos y producen momentos magnéticos espontáneos, incluso en ausencia de un campo magnético externo. La intensidad de las fuerzas de intercambio depende de distancias inter-atómicas, mismas que incrementan al aumentar la temperatura, es decir, al incrementar la temperatura del material se reduce la superposición de orbitales y dis-

minuyen las fuerzas de intercambio, las cuales se vuelven cero en la *Temperatura de Curie*, entendida de manera sencilla como la temperatura en la que un material pierde su magnetización, y cuyo valor es característico de cada sustancia (Lanza y Meloni, 2006).

Los ferromagnéticos están caracterizadas por dos factores fundamentales, son materiales intrínsecamente anisotrópicos y poseen una magnetización instantánea permanente en el tiempo. La susceptibilidad magnética de estos materiales es positiva y posee valores del orden de $10^4 - 10^7$. Las fuerzas de intercambio pueden actuar directamente entre dos cationes continuos o a través de un anión que se encuentre entre ellos. Para el primer caso el material será denominado como *ferromagnético* en sentido estricto, ya que posee momentos de giro mutuamente paralelos y concordantes y genera un momento magnético total en el dominio. En el segundo caso, los momentos de giro son antiparalelos y generan dos 'capas' que se magnetizan en direcciones opuestas. Dependiendo del número de cationes involucrados se pueden tener tres casos (fig.4.2) (Lanza y Meloni, 2006):

- Antiferromagnetismo

Las dos 'capas' que se forman tienen momentos magnéticos con módulos iguales y sentidos opuestos, los cuales se cancelan entre sí, generando un momento magnético total igual a cero y una magnetización nula (Lanza y Meloni, 2006).

- Antiferromagnetismo imperfecto

Los materiales que presentan antiferromagnetismo puro son muy escasos; esto se debe a que cualquier imperfección, ocurrida a nivel atómico, puede producir un desbalance en las redes, mismo que resulta la existencia de una débil magnetización parásita (Caballero, 2011). El antiferromagnetismo imperfecto se refiere a materiales que no presentan capas exactamente antiparalelas, la magnetización resultante es diferente de cero y el dominio tiene un momento magnético débil.

- Ferrimagnetismo

En estos materiales, los dominios presentes en las dos 'capas' se alinean en sentidos opuestos, sin embargo, la cantidad de dominios en un sentido no es la misma que el número de dominios en sentido contrario, por lo que no pueden cancelar

entre sí. Lo anterior genera una magnetización no nula y el dominio tiene un momento magnético (Lanza y Meloni, 2006). En otras palabras, si el material presenta 'capas' con momentos magnéticos de distinta magnitud y antiparalelos, será considerado un material ferrimagnético, y su magnetización irá en el sentido de la capa que posea los momentos magnéticos de mayor magnitud (fig.4.1) (Butler, 2004).



Figura 4.1: Acoplamiento antiparalelo, capas con momentos magnéticos de distinta magnitud, en sentidos opuestos. Modificado de: (Butler, 2004).

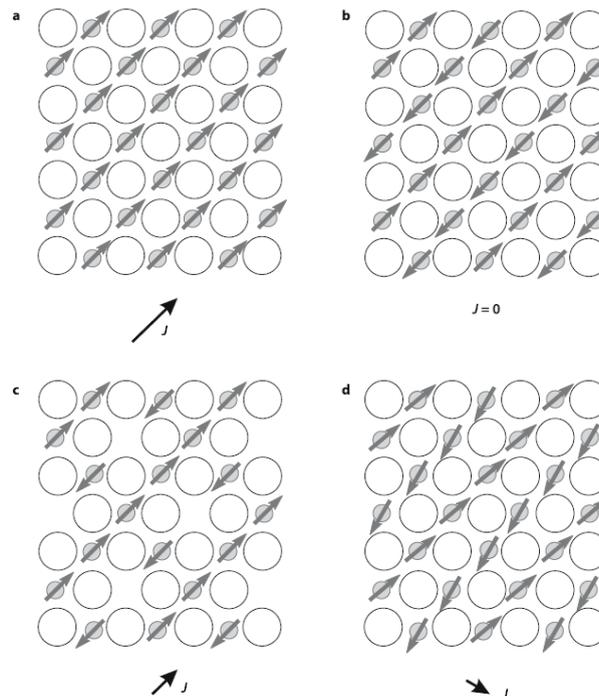


Figura 4.2: a) Ferromagnetismo en sentido estricto b) Antiferromagnetismo c) Ferrimagnetismo d) Antiferromagnetismo imperfecto (Lanza y Meloni, 2006).

4.1.1. Dominios magnéticos

Para abordar este tema consideremos un grano ferromagnético en el que los momentos de giro de los electrones son paralelos entre sí, generando una magnetización J y una energía magnetostática interna E_m , proporcional al volumen del grano. Cuando el volumen crece, la energía magnetostática interna se incrementa hasta llegar a un punto de balance total de energía en el grano, en el que es conveniente que E_m se reduzca, es en este punto en el que el grano se subdivide en dos o más partes en las que el alineamiento de los momentos de giro son antiparalelos y generan la reducción de la energía magnetostática total. Cada una de las partes que presenta una alineación coherente de giro es un *dominio magnético*, es decir, cada región en la que la magnetización es uniforme y su vector de magnetización puede diferenciarse del de regiones vecinas se considera un dominio magnético (Lanza y Meloni, 2006).

Los granos minerales que contienen muchos dominios magnéticos se denominan *multi-dominio (MD)*, y a los que poseen un único dominio se les conoce como granos de un *solo dominio (SD)*. Los granos SD presentan una baja susceptibilidad magnética ya que los giros o 'spin' son paralelos y la aplicación de un campo magnético no los altera. Por otro lado, los granos MD presentan una susceptibilidad relativamente alta, pues la aplicación de un campo magnético externo puede favorecer el crecimiento de aquellos dominios que presenten una magnetización con una dirección cercana a la del campo en cuestión (Evans y Heller, 2003). La frontera entre estos dos tipos de dominios no es tan brusca, hay una región intermedia que posee granos que contienen pocos dominios, en sentido estricto, estos granos serían MD, pero presentan muchas características magnéticas de los granos SD, por este motivo este tipo de partículas se clasifican con una denominación distinta llamándolas *partículas de dominio pseudosimple (PDS)*. Existe una cuarta clasificación, característica de los granos ultra finos que los denomina *Superparamagnéticos (SP)*, en este tipo de partículas la acción de un campo magnético externo orienta la magnetización del grano hacia su dirección, pero una vez que el campo se retira la magnetización decae rápidamente (Lanza y Meloni, 2006).

El comportamiento magnético del grano depende de varios factores como el tipo de mineral, su forma y sus dimensiones, en este sentido la categoría de dominio magnético de cada grano dependerá totalmente del mineral en cuestión. El tipo de dominio magnético del

grano estará controlado por su proceso de formación y su posterior evolución; por tal motivo, el conocer el dominio magnético de las partículas permitirá obtener información acerca del origen y la evolución de depósitos específicos (Evans y Heller, 2003; Lanza y Meloni, 2006).

4.1.2. Magnetita

La magnetita puede catalogarse como el mineral magnético más importante de la Tierra, se encuentra presente en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. La magnetita Fe_3O_4 es un mineral muy denso de color negro y brillante. Este mineral posee un sistema cristalográfico cúbico con la estructura de espinela. Debido a sus características iónicas, la magnetita, presenta dos tipos de espacios intersticiales: tetraédrico y octaédrico, en los cuales se alojan los cationes. Lo anterior da lugar a dos subcapas con momentos magnéticos antiparalelos pero de distinta magnitud, de ahí que la magnetita es un mineral ferrimagnético (Evans y Heller, 2003).

Si se toma en cuenta el volumen de una celda unitaria la magnetización espontánea¹ en este mineral se encuentra alrededor de 480 [kA/m], lo que hace de la magnetita el mineral más magnético de manera natural. La Fe_3O_4 está caracterizada por dos temperaturas, la Temperatura de Curie y la de transición de Verwey, la primera ocurre alrededor de los 580°C, punto en el que el mineral pierde sus propiedades ferrimagnéticas, mientras que la temperatura de transición de Verwey se sitúa a los -150°C y genera cambios en la distribución cristalográfica de los cationes de hierro y el arreglo cúbico se distorsiona hasta una simetría monoclinica. Lo anterior altera la anisotropía cristalina y puede resultar en cambios abruptos de las propiedades magnéticas (Evans y Heller, 2003).

4.1.3. Titanomagnetita

La titanomagnetita es una solución sólida de magnetita y ulvoespinela que se encuentra, generalmente, como mineral primario en rocas ígneas (Tauxe, 2005). Presenta una fórmula general dada por $Fe_{3-x}Ti_xO_4$, cristaliza en un sistema cúbico con la estructura de la espinela. En este mineral los cationes están distribuidos en dos subcapas, A y B, en cuyas celdas

¹Magnetismo característico en materiales ferromagnéticos debido a sus propiedades internas sin necesidad de un campo magnético externo (Evans y Heller, 2003)

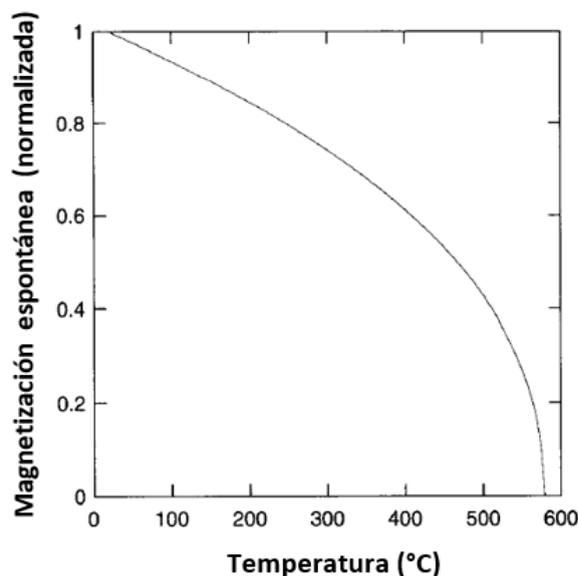


Figura 4.3: Variación de la magnetización espontánea de la magnetita desde la temperatura ambiente hasta la Temperatura de Curie. Modificado de: (Evans y Heller, 2003).

elementales se encuentran 8 y 16 cationes respectivamente. Dentro de estas subcapas, los momentos magnéticos de los electrones asociados a los cationes están acoplados paralelamente pero ambas subcapas son antiparalelas mutuamente, lo cual clasifica a este mineral como ferrimagnético (Lanza y Meloni, 2006).

El valor de la sustitución de titanio en la titanomagnetita se denota por la letra 'x' y va desde cero (magnetita) hasta uno (ulvoespinela). La sustitución del cation Ti^{+4} tiene un efecto intenso en las propiedades magnéticas del mineral, debido a que las fuerzas de interacción se reducen conforme el contenido de titanio aumenta. De la misma manera, al aumentar el contenido de titanio las dimensiones de la celda incrementan (fig.4.4 a), lo cual genera la disminución de la Temperatura de Curie (fig.4.4 b) a la par de un leve incremento en la coercitividad (Lanza y Meloni, 2006; Tauxe, 2005).

Es en la figura 4.4 b donde se observa la variación de la Temperatura de Curie de la Titanomagnetita desde la ausencia de titanio (magnetita) con un valor de 575°C, hasta alcanzar los -153 °C en el valor uno en contenido de titanio, es decir, la Temperatura de Neel de la ulvoespinela, mostrando así un decremento casi lineal conforme el contenido de titanio aumenta (Lanza y Meloni, 2006).

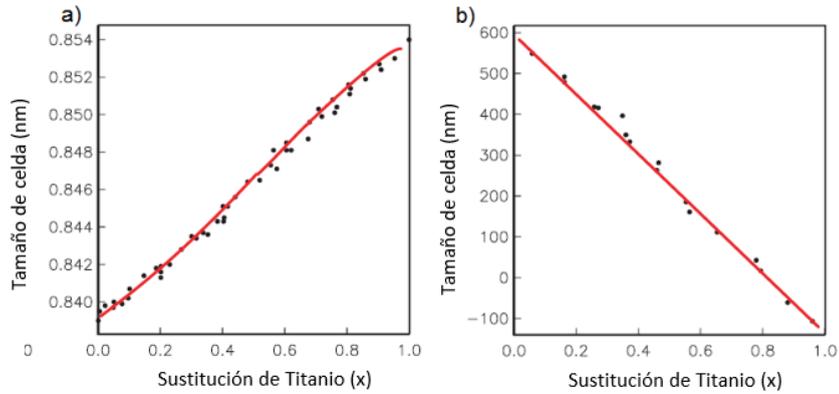


Figura 4.4: a) Incremento del tamaño de celda al aumentar el contenido de titanio b) Disminución de la temperatura de Curie al aumentar el contenido de titanio. Modificado de: (Tauxe, 2005).

4.1.4. Hematita

La hematita es un mineral con importante presencia en la naturaleza, posee una estructura cristalina hexagonal con planos alternados que contienen iones de hierro trivalente, los cuales están magnetizados en direcciones prácticamente opuestas. Esta ligera desviación en el antiparalelismo (llamada spin-canting) hace que la hematita sea clasificada como ferromagnética en lugar de antiferromagnética, presentando una magnetización espontánea de alrededor de 2.5 [kA/m] y una Temperatura de Curie de 675°C, siendo importante destacar que este mineral posee una estabilidad térmica muy alta. La hematita se presenta comúnmente en sedimentos oxidados y domina las propiedades magnéticas de las arenas rojas; en ciertas rocas ígneas se presenta por la oxidación de las mismas a altas temperaturas (Evans y Heller, 2003; Tauxe, 2005).

En este mineral, el hierro puede ser igualmente reemplazado por el titanio, dando lugar a la titanohematita, con fórmula general $Fe_{2-y}Ti_yO_3$, en donde 'y' va de cero (hematita) a uno (ilmenita). Al igual que en la titanomagnetita la titanohematita tiene la característica de que al incrementarse el contenido de Titanio la Temperatura de Curie decrece de manera casi lineal (Evans y Heller, 2003).

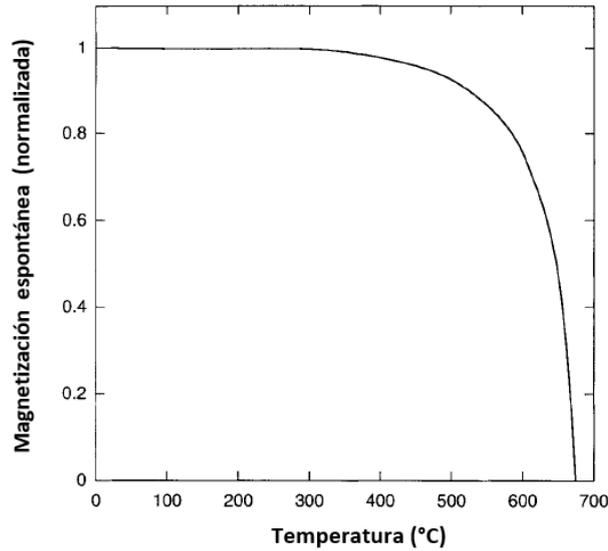


Figura 4.5: Variación de la magnetización espontánea de la hematita desde la temperatura ambiente hasta la Temperatura de Curie. Modificado de: (Evans y Heller, 2003).

4.1.5. Goetita

La goetita ($\alpha - FeO(OH)$) se caracteriza por poseer una coercitividad alta y un sistema cristalino ortorrómbico. Se puede clasificar como un mineral antiferromagnético, pero también puede ser catalogado como un antiferromagnético imperfecto debido a una cantidad "no balanceada" de momentos atómicos, lo cual da lugar a una muy débil magnetización. Al ser un mineral antiferromagnético la Temperatura de Neel se encuentra alrededor de los 120°C (si se considera antiferromagnético imperfecto, este punto sería la Temperatura de Curie), pero puede disminuir debido a la presencia de impurezas en las diferentes capas (Evans y Heller, 2003; Lanza y Meloni, 2006).

Mineral	Fórmula	M_s (kA/m)	T_c (°C)
Magnetita	Fe_3O_4	480	580
Hematita	$\alpha-Fe_2O_3$	~ 2.5	675
Magemita	$\gamma-Fe_2O_3$	380	590–675
Goetita	$\alpha-FeOOH$	~ 2	120
Pirrotita	Fe_7S_8	~ 80	320
Greigita	Fe_3S_4	~ 125	~ 330

Figura 4.6: Propiedades magnéticas de minerales magnéticos comunes. Modificado de: (Evans y Heller, 2003).

4.2. Diagrama ternario

En un sistema de tres componentes cualquier composición mineralógica puede ser representada gráficamente en un diagrama formado por un triángulo equilátero cuyos vértices representan el 100 % de uno de los elementos constituyentes (Fe, Ti O), como se muestra en la figura 4.7 a. El funcionamiento de este diagrama radica en que la suma de la distancia perpendicular desde cualquier punto de los tres lados del triángulo es igual a la altura del mismo, es decir el 100 %, de esta manera las líneas que convergen en el vértice del oxígeno indican hierro y titanio constantes (Evans y Heller, 2003).

Como se pudo apreciar en secciones previas, los óxidos de hierro son los minerales que dominan la mineralogía magnética en la corteza terrestre, por tal motivo los diagramas ternarios se construyen con base en la composición de óxidos de hierro y titanio. Las posiciones de izquierda a derecha indican el incremento en la proporción de hierro férrico (Fe^{+3}) hasta su oxidación a hierro ferroso (Fe^{+2}), mientras que las posiciones verticales indican un incremento en el contenido de titanio (Ti^{+4}) (fig.4.7 b). Al usar $(1/2)Fe_2O_3$ como parámetro de la esquina correspondiente al Fe^{+3} el diagrama se normaliza a un solo catión, generando que las líneas de oxidación (hierro férrico a ferroso) sean paralelas a la base del diagrama. De la misma manera se muestran dos series de soluciones sólidas, la de la titanomagnetita y la de la titanohematita (fig.4.8) (Evans y Heller, 2003; Butler, 2004).

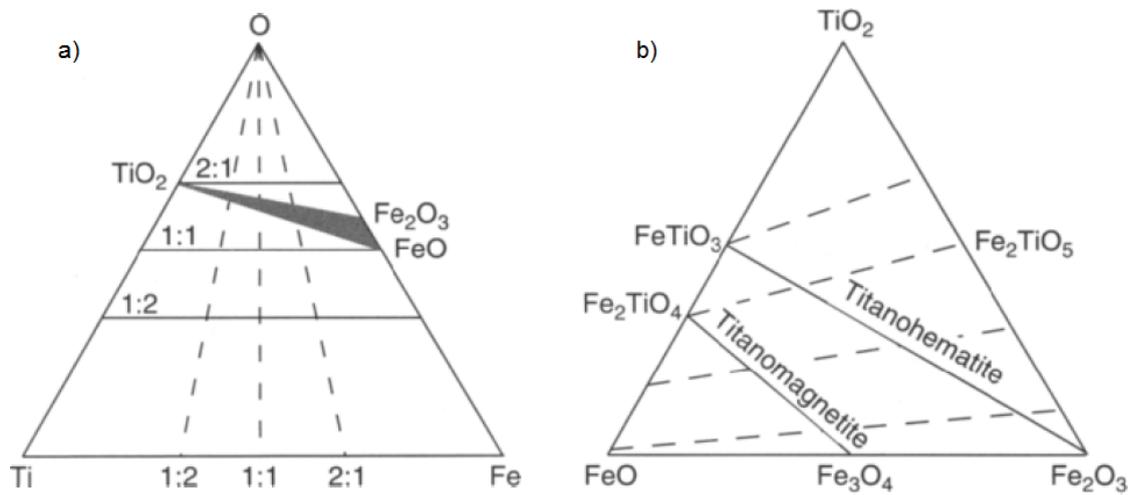


Figura 4.7: a) Diagrama Ternario elemental b) Diagrama Ternario con series de óxidos de hierro y titanio. Modificado de: (Evans y Heller, 2003).

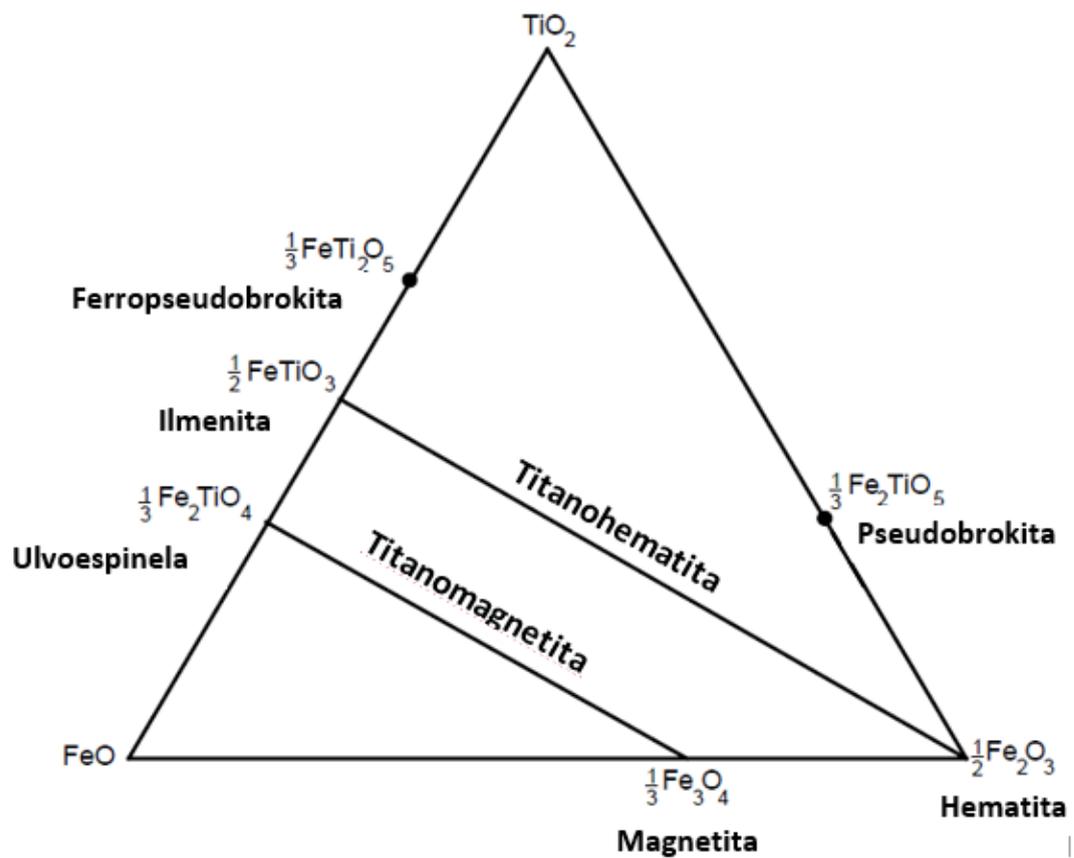


Figura 4.8: Diagrama Ternario con serie de óxidos de hierro y titanio. modificado de: (Butler, 2004)

Capítulo 5

Magnetismo Ambiental

El Magnetismo Ambiental es una ciencia relativamente nueva, es considerada un tema multidisciplinario debido a que integra investigaciones de distintas disciplinas. Esta ciencia se basa en determinar la relación entre las propiedades magnéticas de grupos minerales y los procesos ambientales. Los cambios ambientales y climáticos ocurren sobre escalas de tiempo variables y pueden influenciar la manera en la que los sedimentos son transportados, depositados o la manera en la que se desarrollan las reacciones diagenéticas (Liu *et al.*, 2012). Sea cual sea la historia de un depósito geológico, las mediciones magnéticas aplicadas a sus sedimentos, resultan de gran valor para el entendimiento de las condiciones ambientales que los dominaron en el pasado. Esto es debido a que los minerales magnéticos que se encuentran en ellos, son abundantes en la corteza terrestre, siendo el hierro uno de los elementos con mayor presencia en la misma. (Evans y Heller, 2003).

Al inicio del desarrollo de esta ciencia se tenía como propósito investigar la estabilidad direccional de remanencia que portaban los minerales magnéticos sobre escalas de tiempo geológico, se descubrió que esta estabilidad no solo influía en los dominios de los minerales magnéticos formadores de roca, sino también en cómo esos minerales eran preservados y transformados con el tiempo. Lo anterior, permitió establecer una relación entre las propiedades magnéticas y características de las rocas como: la mineralogía magnética, los cambios en concentraciones mineralógicas y, el tamaño y la forma de grano. Fueron justamente estas relaciones las que fungieron como base de lo que más tarde se conocería como '*Magnetismo ambiental*' (Liu *et al.*, 2012).

Es en 1986 cuando Roy Thompson y Frank Oldfield publican 'Environmental Magnetism' un libro de texto que plantea los lineamientos básicos del tema, definiendo así el nacimiento oficial del Magnetismo Ambiental. Esta publicación señala, entre otras cosas, que las mediciones de parámetros magnéticos se caracterizan por ser eficientes, no destructivas y sobre todo por ser capaces de identificar rasgos particulares en las muestras, los cuales no pueden ser atendidos con otras técnicas. El alcance de estas mediciones ha cobrado relevancia en los últimos treinta años ya que, es de gran utilidad en estudios de Cambio Climático, contaminación e investigaciones sobre la diagénesis de sedimentos, dando así dirección y solución a varios de los problemas más complejos de las Ciencias de la Tierra, Física, Química, Biología y Ciencias Ambientales (Liu *et al.*, 2012).

La implementación de mediciones magnéticas en estudios ambientales, exige entender el comportamiento e interacción de todos los elementos del Sistema Terrestre, (atmósfera, hidrosfera, biosfera y litosfera) (Evans y Heller, 2003), un objetivo que requiere campos de conocimiento capaces de diversificarse y atender las características particulares de cada problema. En este sentido, el magnetismo ambiental genera resultados satisfactorios, ya que todas las sustancias exhiben alguna forma de comportamiento magnético (Evans y Heller, 2003).

El análisis de parámetros magnéticos, representa una herramienta valiosa para hacer frente a uno de los retos más importantes de la actualidad, el estudio y cuidado del medioambiente. La preocupación por las distintas problemáticas ambientales se ha acrecentado en las últimas décadas, viéndose reflejada en acuerdos internacionales que van desde el Protocolo de Montreal hasta el Acuerdo de París en los que no solo se citan asuntos de cuidado medioambiental, sino que se le da especial y vital importancia al Cambio Climático, otro de los temas en los que el Magnetismo Ambiental tiene un papel protagónico.

5.1. Aplicaciones de Magnetismo Ambiental a estudios de contaminación urbana

En años recientes, las mediciones magnéticas se han convertido en un método aceptado para la evaluación de la distribución de agentes contaminantes y la identificación de sus

fuentes. Este tipo de análisis representa una alternativa a los métodos químicos convencionales, ya que son técnicas rápidas, económicas y no destructivas, además de que poseen alta sensibilidad ante la presencia de portadores magnéticos capaces de contener elementos potencialmente tóxicos (EPT) (Lu *et al.*, 2007), por estas razones, desde su presentación formal en la década de los ochenta, ha destacado su implementación en distintos lugares del mundo para la evaluación de sitios contaminados aplicándolos en suelos, polvos y plantas de zonas urbanas.

5.1.1. Estudios en el extranjero

Uno de los primeros estudios que destacan la utilidad del Magnetismo Ambiental como método de análisis es el desarrollado por Beckwith y otros en 1986, en donde se identifican niveles elevados de óxidos magnéticos en suelos, los cuales fueron relacionados con partículas magnéticas suspendidas en el aire. De la misma manera, estudios realizados por Morris *et al.* en 1994 y Versteeg *et al.* en 1995 indicaron que las concentraciones de hidrocarburos y otros metales pesados estaban íntimamente ligados a la presencia de óxidos magnéticos en núcleos del oeste del Lago Ontario. Muchos de los estudios realizados en esta materia mostraron alta correlación entre la susceptibilidad magnética y el contenido de metales pesados en suelos, lo cual permitió establecer a este parámetro como un indicador de la presencia y distribución de contaminantes (Lu *et al.*, 2007).

El uso de mediciones magnéticas como indicadores de contaminación por metales pesados, está basado en el hecho de que el origen de estos últimos y de las partículas magnéticas generalmente está genéticamente relacionado (Lu *et al.*, 2007). Una de las investigaciones que fundamentó esta afirmación, fue la realizada por Versteeg *et al.* (1995) en la que demostró que la concentración de hidrocarburos y metales pesados como el plomo, el zinc y el hierro, estaban íntimamente relacionados con el contenido de óxidos magnéticos en muestras de núcleos del oeste del Lago Ontario (Versteeg *et al.*, 1995).

Como se ha señalado, una de las grandes aplicaciones del Magnetismo Ambiental es la caracterización de partículas ferrimagnéticas en polvos urbanos. En los resultados obtenidos en un estudio realizado por Booth *et al.* (2006) en el oeste de la zona urbana de Midlands en Reino Unido, se muestra que los polvos urbanos contienen un amplio rango de concen-

traciones magnéticas, esta característica hace posible determinar las diferencias existentes entre las partículas magnéticas contaminantes de los distintos corredores de transporte de donde se recolectaron las muestras (Booth *et al.*, 2007). Lo anterior sitúa a la medición de parámetros magnéticos como una metodología valiosa en los esquemas o estrategias locales y nacionales de monitoreo de la contaminación.

Uno de los estudios más recientes realizados por Liu *et al.* en 2012 muestra la caracterización de óxidos de hierro en sedimentos superficiales provenientes de fuentes potenciales de polvo distribuido a través del oeste y norte de China. La colección de minerales magnéticos en las muestras que se estudiaron para esta investigación contienen como minerales antiferromagnéticos (hematita y goetita) como ferrimagnéticos (magnetita y magemita) con una extensa distribución de materiales que indican múltiples orígenes. Los resultados muestran excelentes contrastes en las propiedades iniciales de los polvos que son transportados a la Meseta de Loess China por el monzón asiático de invierno o los vientos del oeste del Océano Pacífico del Norte (Oda *et al.*, 2016).

5.1.2. Estudios en México

El análisis de parámetros magnéticos para estudios ambientales en México es una herramienta relativamente nueva. Destacan estudios realizados en distintas ciudades del país dentro de las que se encuentran Mexicali, Morelia y la Ciudad de México.

El primer estudio realizado en este ámbito, fue hecho por Morton *et al.* en 2009. En él se demuestra el impacto de las actividades antropogénicas en los suelos de la ciudad de México y se destaca que la mayor contribución de metales pesados proviene de emisiones automovilísticas. De la misma manera, se concluye que en áreas urbanas de gran extensión la susceptibilidad magnética permite reconocer, a primera instancia, suelos urbanos contaminados por metales pesados; lo cual permite identificar áreas que requerirán análisis químicos más detallados. A partir de este estudio se obtuvo la tesis de licenciatura titulada 'Propiedades magnéticas y sus relaciones con metales pesados y elementos mayores en suelos superficiales del Valle de México' (Martínez, 2009), en la cual se analizaron parámetros magnéticos como Susceptibilidad Magnética, Magnetización Remanente Isotermal e histéresis magnética; mismos que se correlacionaron con análisis geoquímicos. En este trabajo destaca que la

mejor correlación entre ambos análisis se obtuvo en muestras recolectadas sobre vías rápidas. Así mismo, se conforma la utilidad de los parámetros magnéticos como indicadores de contaminación antropogénica por metales pesados.

Entre otras aplicaciones, se ha estudiado el potencial de las mediciones magnéticas para la clasificación de suelos. En el estudio realizado por Bautista *et al.* en 2014 se señala que la medición de parámetros magnéticos en suelos, como la susceptibilidad magnética y la magnetización remanente anhisterética, permiten identificar procesos de formación de suelos mediante la caracterización de horizontes y materiales presentes en los mismos. De la misma manera, este estudio destaca la utilidad de los análisis y propiedades magnéticas de los suelos para la construcción de mapas de clasificación o bien para la implementación de sistemas de monitoreo de contaminación de suelos a bajo costo.

Por otro lado, en un trabajo desarrollado por Cejudo *et al.* en la Ciudad de México en 2015, se llegó a la conclusión de que a partir de parámetros magnéticos como la Susceptibilidad Magnética Específica, el porcentaje de susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia, y la magnetización remanente isoterma de saturación (MRIS) es posible llevar a cabo la identificación de suelos con altas concentraciones de material magnético cuyo origen se presume de fuentes antropogénicas. Así mismo, se establece la posible relación entre estos parámetros magnéticos y la concentración de ciertos elementos potencialmente tóxicos (como Cr, Pb y Zn), una relación que depende del tipo de ambiente geológico en el que se sitúa el suelo estudiado. En este sentido, el parámetro que resultó más viable para su utilización como proxy de la concentración de elementos específicos como Cr y V, en suelos de la Ciudad de México, fue la MRIS; un proxy para el cual el tipo de ambiente geológico en el que se encuentra el suelo resulta irrelevante.

Un segundo estudio realizado en la Zona Metropolitana del Valle de México, en el que estudiaron tanto polvos urbanos como en la planta *Ficus Benjamina* de distintos puntos (Cejudo *et al.*, 2015b), muestra que el principal portador magnético en muestras de polvos urbanos es la titano-magnetita con bajo contenido en titanio. Este mismo estudio señala la relación existente entre los parámetros magnéticos y el contenido de plomo y zinc en polvos urbanos de la zona. Esta investigación permitió establecer los valores umbrales magnéticos para ambos elementos tanto en polvos ($MRI_{0.7} = 58 [mAm^2/kg]$ y $\chi_{lf} = 4.5 [\mu m^3/kg]$) como en plantas ($MRI_{0.7} = 1.6 [mAm^2/kg]$ y $\chi_{lf} = 0.13 [\mu m^3/kg]$), los cuales tienen como

finalidad la identificación de áreas potencialmente tóxicas, mismas que se ubicaron en la parte norte, centro y sur de la Ciudad de México.

Finalmente, uno de los estudios más recientes realizados en el país, es el desarrollado por Sánchez *et al.* en 2016 en Mexicali, Baja California. En él se analizaron muestras de suelos superficiales a través del incremento de su intensidad magnética, a partir de este análisis se identificó la presencia de minerales ferrimagnéticos de baja coercitividad, como la magnetita impura, de origen antrópico. La intensidad magnética resultante del análisis se encontró superior a uno, lo cual revela que la mayoría de suelos superficiales del área se encuentran contaminados, siendo las localidades con mayor contaminación las que colindan con la zona industrial del sureste de Mexicali.

Capítulo 6

Zona de estudio y adquisición de muestras

6.1. Descripción de la zona de estudio

La Ciudad de México se encuentra en la porción suroeste de la Cuenca del Valle de México entre las latitudes $19^{\circ} 03' 53''$ y $19^{\circ} 35' 33''$ Norte y las longitudes $98^{\circ} 57' 09''$ y $99^{\circ} 22' 15''$ Oeste. Posee una extensión territorial de 1504 [km²], misma que está dividida en 16 delegaciones: Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuahutémoc, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Miguel Hidalgo, Venustiano Carranza, Tlalpan, Xochimilco, Milpa Alta, Tláhuac e Iztapalapa.

En esta ciudad el sistema orográfico es comprendido al norte por la Sierra de Guadalupe, al sur y suroeste por la primera porción de las Sierras de Cuautzin, Ajusco y Monte de las Cruces y al Oeste por el Cerro de la Estrella, la Caldera, la Sierra de Santa Catarina, la colina de Chapultepec, los Peñones de los baños y el Marqués. La Ciudad de México está conformada por rocas ígneas extrusivas mismas que constituyen los sistemas montañosos de la zona y son el resultado de fenómenos eruptivos de distintas etapas geológicas. En lo que respecta a las partes bajas de la Cuenca del Valle de México la litología predominante se centra en rocas de origen sedimentario (López, 2007).

Los depósitos de arcillas lacustres cubren el 23 por ciento de las elevaciones más bajas del Valle de México, siendo la 'capa dura' la que se localiza entre los 10 y 40 metros de profun-

didad y está compuesta principalmente por por sedimentos que tienen predominantemente el tamaño de arenas (López, 2007).

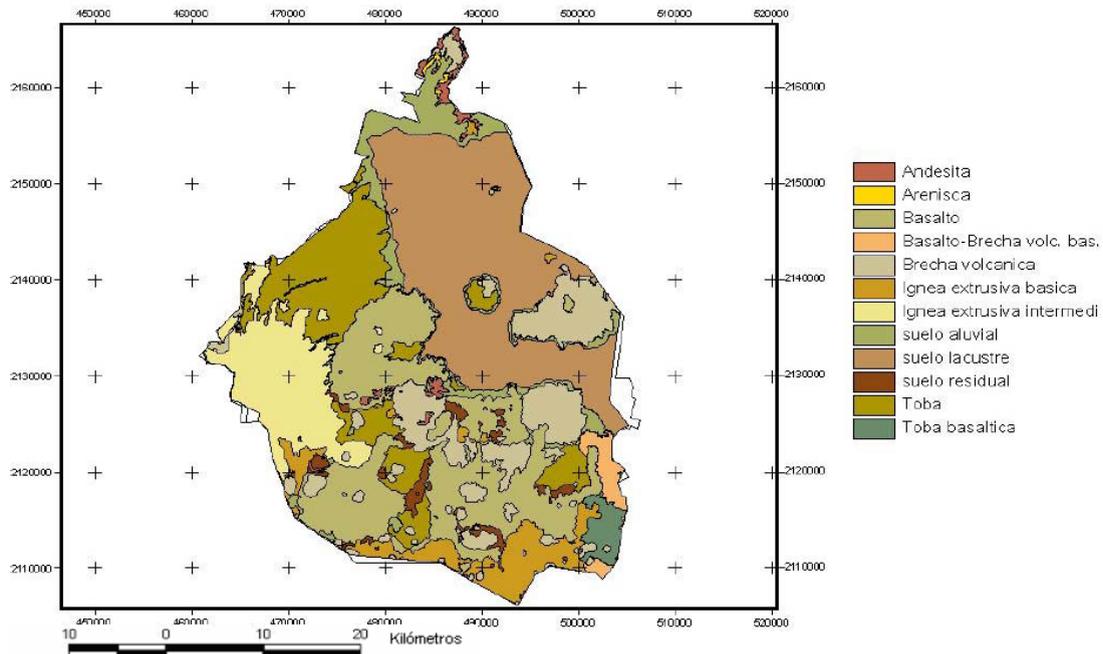


Figura 6.1: Mapa de la geología presente en la Ciudad de México. Tomado de: López (2007)

6.2. Diseño de muestreo

El presente proyecto de tesis se desarrolló como parte de un proyecto para generar un sistema de monitoreo de la contaminación en la Ciudad de México. Tomando en cuenta lo anterior, así como los objetivos planteados, se llevó a cabo una campaña de muestreo que consistió en la proyección de 497 puntos de muestreo de polvos urbanos. Esta población de puntos se generó mediante un muestreo sistemático, en el que la regla empleada fue el seleccionar cada punto de muestreo a una distancia de 900 [m] entre sí. El punto de arranque (punto número uno) fue establecido en la esquina de Avenida Constitución y Calle Aquiles Serdán en la colonia Santiago Tepalcatlalpan de la delegación Xochimilco. Mientras que el punto número 497 se posicionó en la colonia Arboledas de Cuauhtepc en la delegación Gustavo A. Madero.

Esta campaña de muestreo se realizó en dos etapas, la primera comprendida entre el 3 y 11 de marzo, y la segunda entre el 30 de marzo y 3 de abril del 2017. Las muestras

fueron tomadas a pie de banqueta (fig.6.2), cada una de ellas consistió en 30 gramos de polvo recolectado en bolsas con cierre hermético, las cuales membretamos con el número de sitio de muestreo correspondiente. Para los sitios en los que el material particulado no fue suficiente, se recolectó el material faltante en la parte superficial de las jardineras ubicadas en banquetas o camellones (fig.6.3).



Figura 6.2: Recolección de una muestra de polvo urbano a pie de banqueta en la Ciudad de México. Fuente: Brigada de muestreo del proyecto 2017



Figura 6.3: Recolección de polvo urbano en camellón. Fuente: Brigada de muestreo del proyecto 2017

Durante este trabajo de campo se presentaron inconvenientes que impidieron la realización totalmente satisfactoria del proceso de muestreo, dichos inconvenientes fueron los siguientes:

- Tránsito: El tránsito de la Ciudad de México fue un factor determinante en el proceso de muestreo ya que, debido al tiempo de traslado entre un sitio y otro, no se lograron recolectar todas las muestras en una sola etapa.
- Condiciones meteorológicas: En la segunda etapa de muestreo se presentaron chubascos al final de los tres últimos días de recolección. La diferencia entre las condiciones de exposición de estas muestras y las de la primera etapa propicia un sesgo en la concentración de contaminantes de las últimas muestras. Así mismo, al humedecerse el material se impide su recolección, aunado a que el polvo mojado ya no es útil para ser analizado, reduciendo así el número de muestras disponibles.
- Zonas de difícil acceso: La región oeste del mapa presenta doce sitios no recolectados, esto debido a que el relieve y la velocidad de los autos complicaron el acceso a dichos puntos, por lo que se decidió no recolectar muestras en estos sitios.

Tomando en cuenta estos inconvenientes solo se lograron recolectar 475 muestras útiles para analizar. Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, esta tesis sólo aborda una porción del proyecto original, por lo que para el cumplimiento de los objetivos de la misma sólo se seleccionaron 68 muestras de polvo urbano a partir de las cuales se realizarán las mediciones magnéticas.

6.3. Vialidades

Las 68 muestras seleccionadas para análisis fueron recolectadas sobre determinadas vialidades de la ciudad, las cuales se seleccionaron de acuerdo con los siguientes criterios:

- Vialidades que recorren la Ciudad de México de norte a sur o de este a oeste.
- Vialidades en las que el transporte colectivo es el medio de transporte mayormente disponible.
- Vías primarias ¹.

¹Las vías primarias son avenidas que tienen como función facilitar el tránsito vehicular entre distintos puntos de la ciudad, generalmente cuentan con carriles exclusivos para transporte público, sobre ellas los vehículos alcanzan altas velocidades

Las vialidades seleccionadas (fig.6.4) con base en los criterios anteriores se muestran en la figura 6.5, la cual contiene las características de las mismas, el tipo de transporte que circula por ellas y la orientación que siguen, así como las avenidas y delegaciones por las que transitan. Por otro lado, la tabla 6.1, señala cuantas muestras fueron recolectadas sobre cada vialidad.

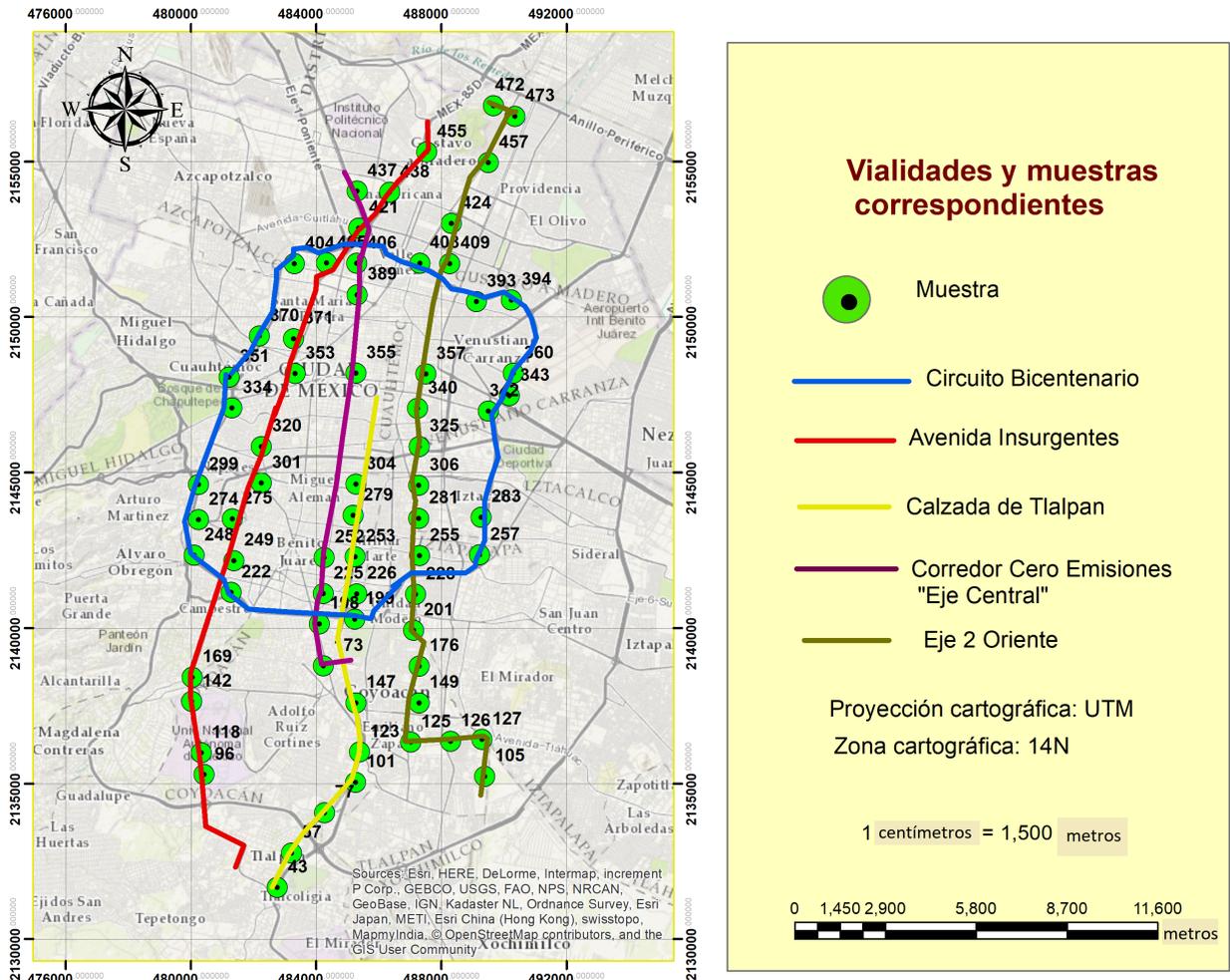


Figura 6.4: Vialidades en las que se ubican las muestras seleccionadas.

Vialidad	Número de muestras recolectadas
Calzada de Tlalpan	10
Avenida Insurgentes	14
Eje 2 Oriente	19
Corredor Cero Emisiones 'Eje Central'	8
Circuito Bicentenario	17

Tabla 6.1: Muestras recolectadas sobre cada vialidad.

Ruta	Recorre la ciudad de:	Vialidad por la que circula	Vialidades que cruza	Delegaciones por las que circula	Transporte colectivo
Corredor cero emisiones "Eje Central"	Norte a Sur	Eje Central	Miguel A. de Quevedo Río Churubusco Viaducto Río de la Loza Av. Hidalgo Paseo de la Reforma Circuito Interior Insurgentes Norte Todos los ejes viales (8, 7, 6, 5, 4, 3 y 2 Sur y Norte 1, 2, 3, 4 y 5)	Benito Juárez Coyoacán Cuauhtémoc Gustavo A. Madero	Trolebús
Ruta 1 Metrobús	Norte a Sur (zona poniente)	Insurgentes	Anillo Periférico Miguel A. de Quevedo Circuito Interior Viaducto Av. Hidalgo Av. Chapultepec Reforma Ticomán Eje 10, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 1 y 2 Norte Eje 3 y 2 Poniente	Gustavo A. Madero Cuauhtémoc Benito Juárez Álvaro Obregón Coyoacán Tlalpan	Metrobús
Circuito Bicentenario	Este a Oeste Norte a Sur	Circuito Interior	Tlalpan División del Norte Insurgentes Viaducto Eje 4 Sur Constituyentes Reforma Río San Joaquín Marina Nacional Vallejo Eje Central Misterios Eje 2 y 3 Oriente Oceanía Eje 1 Norte Ignacio Zaragoza Eje 5 y 6 Sur	Azacapozalco Benito Juárez Cuauhtémoc Gustavo A. Madero Iztacalco Venustiano Carranza Iztapalapa Coyoacán	Autobús con motor Diesel y gas natural
Ruta 37 RTP	Norte a Sur (por el Oriente)	Eje 2 Oriente	La Virgen Eje 3 Oriente Santa Ana Taxqueña Eje 8, 6, 5, 4, 3 y 2 Sur Río Churubusco Av. Canal de Apatlaco Viaducto Fray Servando Circuito Interior Martin Carrera Av. F. C. Hidalgo Fernando Amilpa Eje 1, 2, 3, 4 y 5	Coyoacán Iztapalapa Iztacalco Venustiano Carranza Gustavo A. Madero	RTP
Ruta 1 de microbuses	Norte a Sur	Calzada de Tlalpan	Taxqueña Río Churubusco Eje 7, 6 y 5 Viaducto Fray Servando Periférico	Xochimilco Tlalpan Iztacalco	Microbús

Figura 6.5: Vialidades en las que se ubican las muestras seleccionadas.

Capítulo 7

Experimentos de laboratorio

7.1. Instrumentación empleada

Para realizar las mediciones de cada una de las propiedades magnéticas de los polvos urbanos se utilizaron los distintos instrumentos del Servicio Arqueomagnético Nacional y del Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental (LUGA) del Instituto de Geofísica Unidad Michoacán. Dichos instrumentos fueron los siguientes:

- Medidor de susceptibilidad dependiente de la temperatura MFK1-CS4

Este equipo también fue utilizado para realizar las mediciones de susceptibilidad dependiente de la temperatura mediante el componente CS4 (fig.7.1 b). Este es un horno de alta temperatura que mide la variación de la susceptibilidad magnética de campo bajo de los minerales con respecto a la temperatura, misma que puede variar de temperatura ambiente hasta los 700 °C. Este aparato consiste en un horno libre de material magnético con un termómetro especial de platino, una unidad de control de temperatura, una fuente de poder, un depósito de agua fresca con bomba y un medidor de flujo de argón. La muestra debe colocarse en un recipiente de medición que es calentado por un cable de platino, este proceso puede llevarse a cabo a tres velocidades distintas elegibles por el usuario. La temperatura es medida mediante un termosensor de platino especial. Con el objetivo de realizar las mediciones de susceptibilidad en un rango de temperatura elegido el equipo mueve la muestra dentro y fuera de la bobina (fig.7.1 b) que permite recolectar los datos. Todo este proceso de medición se realiza

de manera automática y controlado por el software el instrumento (AGICO., 2009).

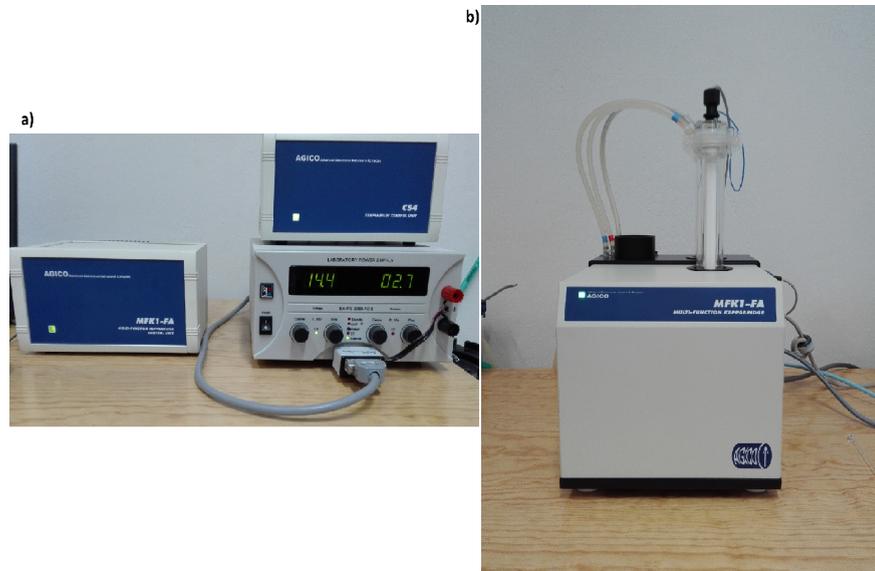


Figura 7.1: a) Se muestra la fuente de poder del equipo de medición de susceptibilidad así como el horno de alta temperatura CS4 / b) Bobina que permite medir la susceptibilidad de la muestra, así como el tubo en el que es colocada la misma para la medición de susceptibilidad dependiente de la temperatura.

- Medidor de susceptibilidad MFK1-FA

El MFK1 se uso para medir la susceptibilidad de la muestra en tres frecuencias distintas (976 Hz. 3904 Hz. y 15616 Hz.), y posteriormente para obtener las curvas de susceptibilidad dependiente de la temperatura, desde temperatura ambiente hasta los 600 °C con una razón de calentamiento de 20 °C.

Durante la medición de la susceptibilidad magnética la muestra gira lentamente a lo largo de tres ejes perpendiculares. El indicador de susceptibilidad se lleva a cero cada vez que se inserta una nueva muestra dentro de la bobina, esto genera diferencias de susceptibilidad medidas durante los giros de la muestra (64 mediciones por giro) lo cual permite determinar los componentes anisotrópicos del tensor de susceptibilidad con alta sensibilidad. Posteriormente, se mide un valor de susceptibilidad magnética volumétrica a lo largo de un sólo eje y el tensor de susceptibilidad completo se combina con estas mediciones. Los datos medidos, incluyendo orientaciones y direcciones de las susceptibilidades principales, se muestran en pantalla en distintos sistemas de coordenadas (AGICO., 2009).

Esta versión del instrumento permite realizar las mediciones de susceptibilidad en tres frecuencias distintas (976 [Hz], 3904 [Hz] y 15616 [Hz]), no sólo en dos como en versiones anteriores, lo cual permite generar análisis más detallados de la susceptibilidad de la muestra (AGICO., 2009).

- Magnetómetro de giro de doble velocidad JR6

Este instrumento se utilizó para medir Magnetización Remanente Natural, Magnetización Remanente Isotermal y Magnetización Remanente Anhisterética.

El funcionamiento de este instrumento está basado en componentes microeléctricos, así como en dos microprocesadores que controlan y prueban la velocidad de rotación de la muestra, la ganancia de la señal, la adquisición de datos, el filtrado digital y la manipulación de la autoposición. Este magnetómetro es configurado en su totalidad por una computadora externa, través del canal RS232C (AGICO., 2004).

El principio de medición de este instrumento se basa en que la muestra, de tamaño y forma definidos, rota a una velocidad angular constante en el porta-muestras que se encuentra dentro de un par de bobinas. Un voltaje de corriente alterna es inducido en las bobinas, su amplitud y fase dependen de la dirección y magnitud del vector de Magnetización Remanente de la muestra. El voltaje es amplificado, filtrado y digitalizado, para que posteriormente, la computadora calcule, mediante análisis de Fourier, las componentes rectangulares de la proyección del vector de Magnetización Remanente dentro del plano perpendicular al eje de rotación (AGICO., 2004).

El magnetómetro es operado desde una computadora a través del canal RS-232C usando la paquetería REMA6, dentro de la cual debe seleccionarse el tipo de Magnetización Remanente que se desea medir (Natural, Isotermal o Anhisterética). Dicha paquetería habilita las mediciones del vector de Magnetización Remanente, su conversión al sistema geográfico y paleogeográfico y finalmente el registro de los archivos de datos (AGICO., 2004).

La medición estándar del vector de Magnetización Remanente del material consiste en mediciones sucesivas de cuatro posiciones diferentes de la muestra, tomando en cuenta la dirección de orientación del porta-muestras. La medición completa produce cuatro

valores para la componente Z del vector de Magnetización Remanente, así como dos valores para las componentes X y Y (fig.7.2) a partir de los cuales se genera el calculo de valores promedio (AGICO., 2004), es decir:

- Posición 1: Medición de la Magnetización en dirección 'x' y 'z'.
- Posición 2: Medición de la Magnetización en dirección 'y' y 'z'.
- Posición 3: Medición de la Magnetización en dirección 'x' y 'z'.
- Posición 4: Medición de la Magnetización en dirección 'y' y 'z'.

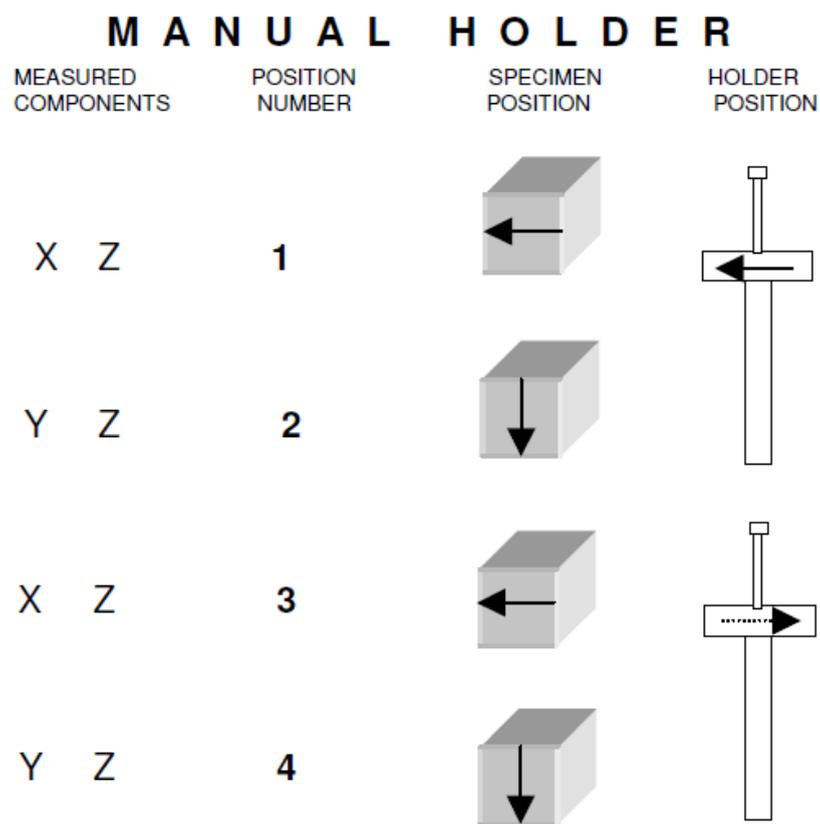


Figura 7.2: Configuración de las cuatro posiciones de medición de la Magnetización. Modificado de: AGICO. (2004)

Para llevar a cabo mediciones con este equipo es importante considerar que debe realizarse un procedimiento de calibración cada vez que se encienda el instrumento y antes de que se comiencen las mediciones. Dicho procedimiento consiste en medir una muestra estándar que genera la ganancia y la fase para el cálculo de los componentes del

vector de remanencia. Esta calibración permite obtener errores por debajo del 1.5 %, sin ella los valores de Magnetización obtenidos pueden diferir hasta en un 5 % de los valores reales. De la misma manera, se debe generar una corrección por porta-muestras, en la que se mide la magnetización del portamuestras vacío. Los valores, casi nulos, obtenidos en este procedimiento, se restan automáticamente de las mediciones de cada componente (AGICO., 2004).

Para llevar a cabo la calibración es necesario esperar de 15 a 20 minutos después de encender el equipo para permitirle lograr el equilibrio térmico con el ambiente.



Figura 7.3: a)Dispositivo de giro y medición del magnetómetro. b) Fuente de poder del equipo. c) Porta-muestras.

- Desmagnetizador de campo alterno/ Magnetizador anhisterético y de pulso LDA5/PAM1
Este equipo fue empleado para proveer a las muestras de Magnetización Remanente Anhisterética, misma que fue medida posteriormente en el magnetómetro de giro JR6. La Magnetización Remanente Anhisterética (MRA) se adquiere cuando una muestra es expuesta a un campo magnético de corriente alterna que decrece en amplitud gradualmente, al mismo tiempo que se le aplica un campo magnético de corriente directa (generalmente de $100[\mu T]$). La amplitud del campo de corriente alterna controla cuales partículas participan en el proceso de magnetización (según la coercitividad de las mismas), mientras que la intensidad del campo de corriente directa controla cuantas de esas partículas se magnetizan. Por lo general, el campo de corriente directa se aplica durante todo el proceso de decremento del campo de corriente alterna, sin embargo, existen casos especiales en los que en los que el campo de corriente directa se aplica en un tiempo limitado dentro de una ventana de coercitividad de corriente alterna,

con el objetivo de que la muestra adquiere una magnetización remanente anhisterética parcial (fig.7.5) (AGICO., 2013).

La adquisición de Magnetización Remanente Anhisterética de la muestra se lleva a cabo en la unidad de muestra del LDA5/PAM1. En esta unidad el campo de corriente directa es paralelo a los ejes de la bobina y apunta hacia afuera de la misma. El dispositivo que gira la muestra dentro de la unidad posee dos ejes que facilitan el posicionamiento de la muestra en 18 orientaciones distintas (con respecto al eje de la bobina) y por consiguiente facilitan la adquisición de una Magnetización Remanente Anhisterética direccional.

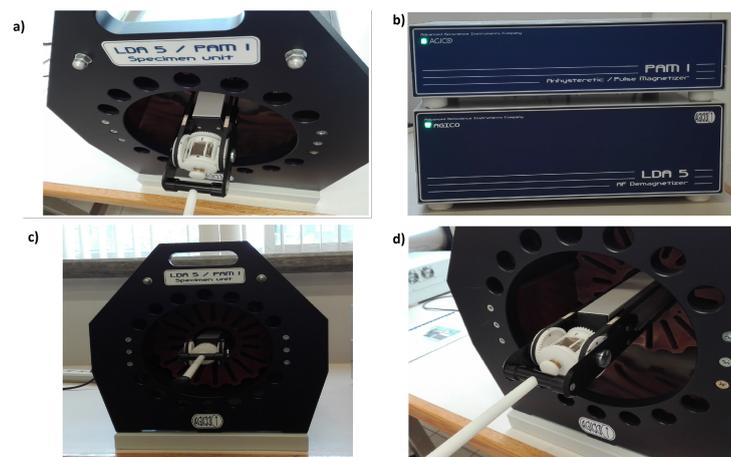


Figura 7.4: a) Portamuestras del equipo. b) Magnetizador de pulsos y desmagnetizador. c) y d) Bobina del equipo desde distintos ángulos.

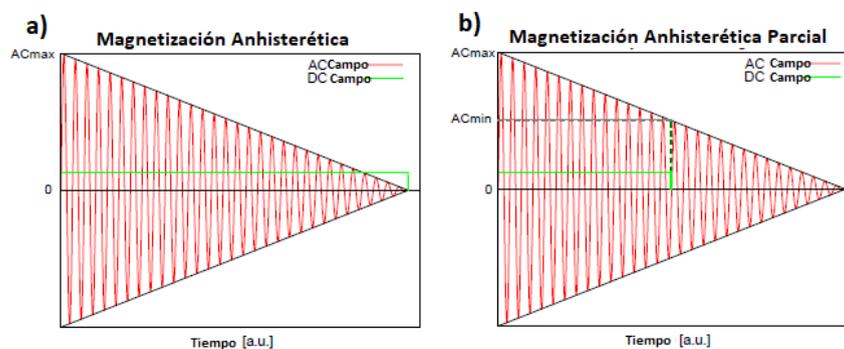


Figura 7.5: a) Magnetización Anhisterética: Todas las partículas cuya coercitividad sea igual o menor al campo de corriente alterna máximo aplicado, se magnetizarán. b) Magnetización anhisterética parcial: Sólo se magnetizarán las partículas cuya coercitividad se encuentre dentro de la ventana limitada por los valores de campo de corriente alterna mínimo y máximo. Figura modificada de: AGICO. (2013).

El equipo es controlado por el programa LDA5 desde una computadora, en el cual se selecciona el modo del instrumento, es decir, se elige si se desea utilizar el desmagnetizador, el magnetizador anhisterético o el magnetizador de pulsos. Así mismo, se configuran los parámetros del proceso tales como la amplitud máxima del campo de corriente alterna, la intensidad del campo de corriente directa, el tipo de decremento y el tiempo del mismo (fig.7.6).

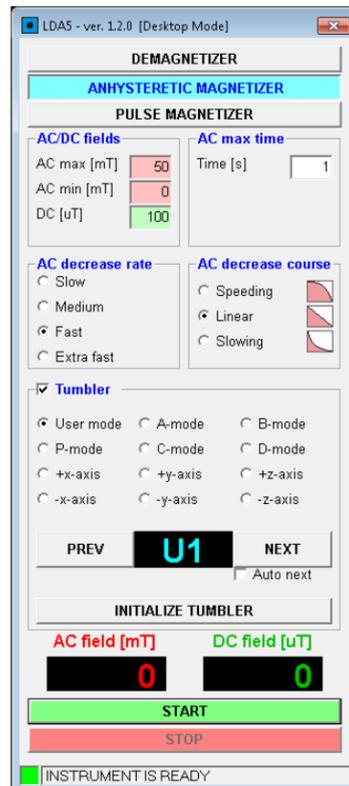


Figura 7.6: Panel de configuración de parámetros para aplicar magnetización anhisterética. Figura tomada de: AGICO. (2013).

- Magnetizador de pulsos ASC IM100

Este equipo está diseñado para producir un pulso magnético de alta intensidad de campo y de corta duración con el propósito de magnetizar una muestra, esta característica lo hace un instrumento ideal para el estudio de la Magnetización Remanente Isotermal (MRI). Esta unidad está habilitada para producir campos de 0.005 [T] hasta los 0.5 [T], usando una de cuatro bobinas para diferentes rangos de campo (ASC Scientific., 2013).

Los campos magnéticos son producidos por la descarga de energía que va de un capacitor hasta una bobina que rodea la cavidad en donde se posiciona la muestra. El capacitor primero se carga al voltaje deseado (correspondiente al campo deseado). Posteriormente se descarga rápidamente a través de la bobina utilizando un interruptor. Debido a que en este proceso están involucrados altos niveles de corriente, tanto la bobina como todo el circuito están contenidos en una sola caja (ASC Scientific., 2013).

Para aplicar un pulso de campo magnético a la muestra se debe colocar la misma en la cavidad del equipo, llevar la perilla de voltaje al valor de voltaje correspondiente al campo deseado, para posteriormente esperar a que el equipo en dicho valor, presionar el interruptor y esperar a que el voltaje comience a descender, lo cual indicará que la muestra se puede retirar.

Una vez aplicado el campo magnético, se lleva la muestra al magnetómetro JR6 para medir la Magnetización Remanente Isotermal de la misma.



Figura 7.7: Magnetizador de pulsos, con interruptor y perilla de ajuste.

7.2. Preparación de muestras

Todas las muestras recolectadas fueron secadas durante dos semanas a temperatura ambiente a la sombra, con el objetivo de evitar algún tipo de oxidación de los minerales. Posteriormente, se tamizó el material para eliminar partículas de mayor tamaño, como restos de plantas y materia orgánica en general, para finalmente colocar cada muestra de polvo en

cubos de acrílico de 10 [cm³]. Se rellenó cada cubo completamente, cuidando que el material particulado no se desplazara dentro del mismo, ya que de ser así, era necesario colocar un trozo de algodón antes de colocar la tapa del cubo; esto con la finalidad de que el material no tenga movimiento dentro del mismo. Una vez cerrado el cubo, se procedió a asegurarlo, colocando cinta adhesiva alrededor de la unión de la tapa. Finalmente, cada cubo se membretó con el número de muestra, y las siglas CDMX, y se orientó (colocando una flecha hacia la izquierda, al frente del cubo) para posteriormente proceder a realizar las mediciones magnéticas.

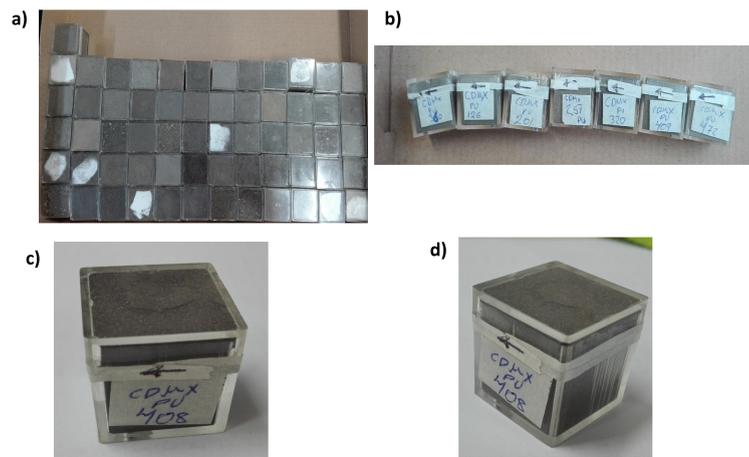


Figura 7.8: a)Muestras seleccionadas para análisis. b)Muestras membretadas. c) y d) Muestra orientada.

7.3. Experimentos de susceptibilidad magnética en función de la temperatura

Las curvas de susceptibilidad magnética dependiente de la temperatura se realizaron para muestras seleccionadas de acuerdo con el tipo de transporte que circula sobre las vialidades (Tabla 7.1), y cuyas mediciones de llevaron a cabo usando un equipo MFK1-FA/CS4.

Para hacer la medición de susceptibilidad magnética dependiente de la temperatura, fue necesario tamizar nuevamente el material, así como retirar las partículas de materia orgánica que pudieran quemarse durante el proceso. La porción de muestra tamizada y libre de materia orgánica se colocó en el tubo de ensayo del equipo, y se pesó en una balanza digital.

Con la muestra posicionada en el equipo se procedió a configurar el rango de temperatura

a la cual se realizaron las mediciones, mismo que se estableció desde temperatura ambiente y hasta los 600 ° C, con una razón de calentamiento de 20 ° C (5 °C/min). Posteriormente, la muestra sufrió un proceso de enfriamiento a la misma razón de cambio que en el calentamiento.

Número de muestra	Vialidad
198	Calzada de Tlalpan
201	Eje 2 Oriente
222	Avenida Insurgentes
226	Calzada de Tlalpan
248	Circuito Bicentenario
249	Avenida Insurgentes
255	Eje 2 Oriente
257	Circuito Bicentenario
304	Calzada de Tlalpan
357	Eje 2 Oriente
360	Circuito Bicentenario
370	Circuito Bicentenario
371	Avenida Insurgentes
394	Circuito Bicentenario
404	Circuito Bicentenario

Tabla 7.1: Muestras seleccionadas y vialidades correspondientes.

7.4. Mediciones de Susceptibilidad Magnética a tres frecuencias

Las mediciones de susceptibilidad magnética volumétrica κ se realizaron a partir del medidor de susceptibilidad *MFK1 – FA*. Este equipo permite medir la susceptibilidad de la muestra a tres frecuencias distintas: 976[Hz], 3904[Hz] y 15616[Hz]. La utilidad de este procedimiento radica en que permite determinar, con mayor precisión, la presencia de

minerales ferrimagnéticos y superparamagnéticos ultrafinos, es decir, menores a $0.03 \mu m$.

Para llevar a cabo este procedimiento fue necesario comenzar a calibrar el equipo, quince minutos después de encenderlo. Este proceso de calibración, tiene una duración aproximada de 20 minutos, después de los cuales es posible comenzar a realizar las mediciones.

Con el equipo calibrado se procede a seleccionar la primera de las tres frecuencias con las que se realizarán las mediciones, esta selección se lleva a cabo mediante el software del propio equipo. Posteriormente, se coloca la muestra en el porta muestras, de manera que la flecha de orientación que se colocó sobre el cubo apunte hacia abajo y se encuentre en la cara visible del mismo, definiendo esta como la posición 1. Cuando la medición en esta posición ha terminado, se rota la muestra a la posición número dos, y finalmente a la posición número tres (fig. 7.9). Este procedimiento se repite para cada frecuencia y cada muestra, es decir, para cada muestra se realizan las mediciones a tres frecuencias en las tres posiciones requeridas por el equipo (x, y, z).

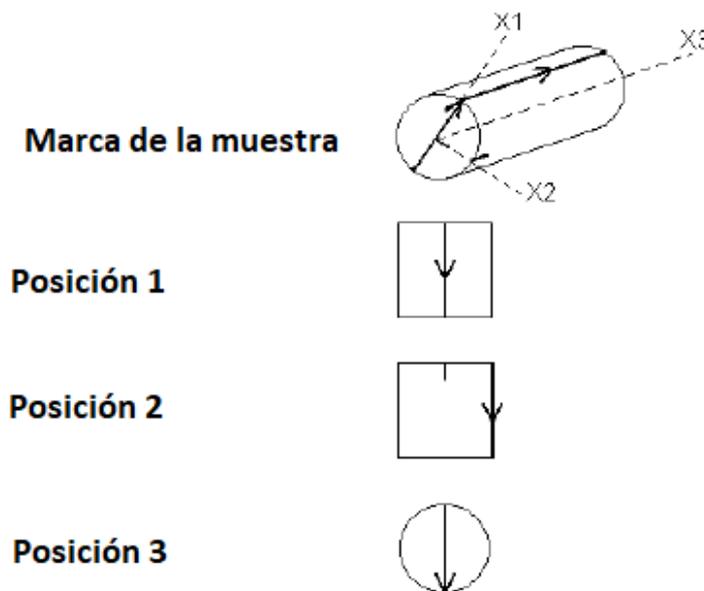


Figura 7.9: Posiciones a las que fue medida la susceptibilidad magnética de cada muestra. Modificado de: Bartington Instruments. (2010)

A partir de lo anterior, se obtuvieron tres valores de susceptibilidad (a tres frecuencias distintas $976[Hz]$, $3904[Hz]$ y $15616[Hz]$), para cada muestra, mismos que se muestran en la tabla A.1 que se encuentra en el apéndice A.

7.5. Mediciones de MRN

Una vez realizadas las mediciones de susceptibilidad magnética en las 68 muestras seleccionadas se realizaron las mediciones de Magnetización Remanente Natural de las mismas, utilizando el magnetómetro de giro JR6.

Para iniciar el procedimiento de medición fue necesario configurar el software del instrumento, seleccionando dentro del menú la opción de "MRN" la cual señala que el tipo de magnetización a medir será la Magnetización Remanente Natural. Lo anterior, sin olvidar la calibración y la corrección del holder, obligatorias para comenzar a utilizar el equipo.

Los cubos de acrílico, membretados y orientados, que contenían la muestra se situaron en el holder del magnetómetro. Con la muestra posicionada en el holder, se aseguró el portamuestras y se colocó el casco aislante para impedir cualquier tipo de influencia de un campo externo. Cada muestra se midió en cuatro posiciones distintas como se indicó en la figura 7.2 de la sección anterior. En cada una de las posiciones fue necesario verificar que el error calculado fuera menor al 5 %, de no ser así era necesario eliminar el valor de la medición y verificar que la muestra estuviera colocada de manera correcta en el holder para después realizar la medición de esa posición nuevamente.

De esta manera se realizaron cuatro mediciones por muestra para obtener el valor final de Magnetización Remanente Natural correspondiente. El archivo obtenido a partir del magnetómetro JR6, muestra la medición de la Magnetización Remanente Natural en direcciones X, Y y Z, por lo que para obtener el valor de MRN final es necesario aplicar la ecuación 7.1¹. Los valores de Magnetización Remanente Natural en cada dirección y el valor final de MRN se muestran en la tabla A.2 del apéndice A.

$$NRM = \sqrt{[NRM_X]^2 + [NRM_Y]^2 + [NRM_Z]^2} \quad (7.1)$$

¹Este procedimiento aplica a todas las magnetizaciones remanentes medidas (MRN, MRA y MRI) ya que todas ellas se midieron en el magnetómetro de giro JR6. La ecuación señalada se aplica, de igual forma, a los datos de cada tipo de magnetización

7.6. Mediciones de MRA

Se empleó el Magnetizador Anhisterético LDA5/PAM1 para la adquisición de Magnetización Remanente Anhisterética en la muestra. Para realizar este paso, se configuraron los parámetros de los campos a los cuales se expondría la muestra. El campo de corriente alterna se configuró a $120[mT]$ con una duración de $10[s]$, mientras que el campo de corriente directa se estableció a $100[\mu T]$. El decremento de la corriente alterna fue configurado de forma lineal y rápida en el menú del software utilizado.

Una vez que la muestra adquirió la magnetización anhisterética correspondiente se procedió a medir la misma en el magnetómetro de giro JR6. En este caso el software se configuró para realizar la medición de 'MRA' y se procedió a realizar el mismo procedimiento de medición que se llevó a cabo para la Magnetización Remanente Natural.

El proceso anterior fue realizado para cada una de las 68 muestras seleccionadas obteniendo los valores mostrados en la tabla del anexo .

- Obtención de curvas de Magnetización Remanente Anhisterética

Con el objetivo de comprender y observar el proceso de adquisición de curvas de Magnetización Remanente Anhisterética, se seleccionaron, de manera aleatoria, siete muestras recolectadas sobre distintas vialidades: las muestras 360, 257 y 472, recolectadas sobre Circuito Bicentenario; las muestras 126, 201 y 409, ubicadas sobre Eje 2 Oriente; y la muestra 320 recolectada sobre Avenida Insurgentes.

Esta selección tuvo el propósito de realizar un proceso más detallado de medición, en el que se pudieran apreciar los cambios entre la aplicación de distintos campos de corriente alterna. Para ello, primeramente se desmagnetizaron las siete muestras seleccionadas para posteriormente aplicar, en cada una de ellas, campos de corriente alterna de $20[mT]$, $40[mT]$, $60[mT]$, $80[mT]$, $100[mT]$ y finalmente $120[mT]$ respetando el mismo valor de campo de corriente directa anteriormente señalado ($100[\mu T]$), así como los parámetros de decremento de la corriente alterna. El procedimiento de medición fue exactamente el mismo que el que se realizó para la medición de la Magnetización Remanente Anhisterética de las 68 muestras, sólo que en este caso se realizaron seis mediciones de MRA por muestra, es decir una por cada campo de corriente alterna

aplicado. Los valores obtenidos se muestran en las tablas A.3, A.4, A.5, A.6, A.7 y A.8 del apéndice A.

7.7. Adquisición de curvas de Magnetización Remanente Isotermal

Una vez seleccionado el voltaje correspondiente al campo magnético que se desea aplicar (Tabla 7.2), es necesario esperar a que dicho voltaje se estabilice en el valor exacto. Mientras el equipo se estabiliza debe colocarse la muestra dentro de la cavidad utilizando un portamuestras de acrílico. Por conveniencia se estableció que, para aplicar un campo directo a la muestra, la flecha de orientación tendría que ser dirigida hacia afuera de la cavidad y observada en la cara superior del cubo. Por el contrario, si el campo que se desea aplicar es un campo inverso, la flecha de orientación debía apuntar hacia adentro de la cavidad y situarse en la cara inferior del cubo. Una vez que se aplica el pulso de campo magnético se debe esperar unos segundos. Hasta observar que el valor de voltaje comienza a descender es posible retirar la muestra de la cavidad. Todas las muestras fueron expuestas a un campo directo de $1000[mT]$ para la adquisición de MRI para posteriormente aplicarles campos inversos de $100[mT]$, $200[mT]$ y $300[mT]$.

Tras la exposición de cada muestra a los campos magnéticos señalados en la tabla 7.2 se procedió a realizar la medición de Magnetización Remanente Isotermal de cada muestra. Para ello, fue necesario seleccionar la opción de 'MRI' en el software del magnetómetro y seguir el procedimiento de medición descrito en las mediciones de magnetización anteriores.

En este caso, también se llevó a cabo un proceso de adquisición y medición de MRI más detallado para observar el comportamiento de las muestras tras la aplicación de cada campo. Para ello, las siete muestras seleccionadas anteriormente se expusieron a todos los campos directos señalados en la tabla 7.2 y a campos inversos de $100[mT]$, $200[mT]$ y $300[mT]$. Nuevamente, tras cada aplicación de pulso se realizaron las mediciones correspondientes de MRI para cada muestra ².

²Con el objetivo de sintetizar los procesos de experimentación, el cálculo de los parámetros empleados y las características que estos determinan, se muestra la tabla B.1 en el anexo B

Magnetizador ASC-IM100	
Campo magnético [mT]	Voltaje
25	8.8
50	16.4
75	24.1
100	30.9
200	61.7
300	92.6
500	153.9
700	216.2
800	247.4
1000	309.7

Tabla 7.2: Voltaje correspondiente al campo magnético deseado.

Capítulo 8

Tratamiento de datos y resultados

Para poder interpretar los resultados obtenidos a partir de los procesos de medición realizados, se agrupó la información sobre el número de muestra, la vialidad y el tipo de transporte en la tabla 8.1.

Vialidades y transporte correspondientes a cada muestra		
No. de muestra	Vialidad	Tipo de transporte
43	Calzada de Tlalpan	Microbús
57	Calzada de Tlalpan	Microbús
77	Calzada de Tlalpan	Microbús
96	Avenida Insurgentes	Metrobús
101	Calzada de Tlalpan	Microbús
105	Eje 2 Oriente	Trolebús
118	Avenida Insurgentes	Metrobús
123	Calzada de Tlalpan	Microbús
125	Eje 2 Oriente	RTP
126	Eje 2 Oriente	RTP
127	Eje 2 Oriente	RTP
142	Avenida Insurgentes	Metrobús
147	Calzada de Tlalpan	Microbús
149	Eje 2 Oriente	RTP
169	Avenida Insurgentes	Metrobús

173	Corredor Cero Emisiones Eje Central	Trolebús
176	Eje 2 Oriente	RTP
198	Corredor Cero Emisiones Eje Central	Trolebús
199	Circuito Bicentenario (Sur)	Autobús (diesel/gas natural)
201	Eje 2 Oriente	RTP
222	Circuito Bicentenario (Sur)	Autobús (diesel/gas natural)
225	Corredor Cero Emisiones Eje Central	Trolebús
226	Calzada de Tlalpan	Microbús
228	Eje 2 Oriente	RTP
248	Circuito Bicentenario (Oeste)	Autobús (diesel/gas natural)
249	Avenida Insurgentes	Metrobús
252	Corredor Cero Emisiones Eje Central	Trolebús
253	Calzada de Tlalpan	Microbús
255	Eje 2 Oriente	RTP
257	Circuito Bicentenario (Este)	Autobús (diesel/gas natural)
274	Circuito Bicentenario (Oeste)	Autobús (diesel/gas natural)
275	Avenida Insurgentes	Metrobús
279	Calzada de Tlalpan	Microbús
281	Eje 2 Oriente	RTP
283	Circuito Bicentenario (Este)	Autobús (diesel/gas natural)
299	Circuito Bicentenario (Oeste)	Autobús (diesel/gas natural)
301	Avenida Insurgentes	Metrobús
304	Calzada de Tlalpan	Microbús
306	Eje 2 Oriente	RTP
320	Avenida Insurgentes	Metrobús
325	Eje 2 Oriente	RTP
334	Circuito Bicentenario (Oeste)	Autobús (diesel/gas natural)
340	Eje 2 Oriente	RTP
342	Circuito Bicentenario (Este)	Autobús (diesel/gas natural)
343	Circuito Bicentenario (Este)	Autobús (diesel/gas natural)

351	Circuito Bicentenario (Oeste)	Autobús (diesel/gas natural)
353	Avenida Insurgentes	Metrobús
355	Corredor Cero Emisiones Eje Central	Trolebús
357	Eje 2 Oriente	RTP
360	Circuito Bicentenario (Este)	Autobús (diesel/gas natural)
370	Circuito Bicentenario (Oeste)	Autobús (diesel/gas natural)
371	Avenida Insurgentes	Metrobús
389	Corredor Cero Emisiones Eje Central	Trolebús
393	Circuito Bicentenario (Norte)	Autobús (diesel/gas natural)
394	Circuito Bicentenario (Norte)	Autobús (diesel/gas natural)
404	Circuito Bicentenario (Norte)	Autobús (diesel/gas natural)
405	Avenida Insurgentes	Metrobús
406	Corredor Cero Emisiones Eje Central	Trolebús
408	Circuito Bicentenario (Norte)	Autobús (diesel/gas natural)
409	Eje 2 Oriente	RTP
421	Avenida Insurgentes	Metrobús
424	Eje 2 Oriente	RTP
437	Corredor Cero Emisiones Eje Central	Trolebús
438	Avenida Insurgentes	Metrobús
455	Avenida Insurgentes	Metrobús
457	Eje 2 Oriente	RTP
472	Eje 2 Oriente	RTP
473	Eje 2 Oriente	RTP

Tabla 8.1: Vialidades en las que se recolectó cada muestra, y el transporte que circula en ellas.

8.1. Determinación de los principales portadores magnéticos mediante curvas κ -T

Para obtener las curvas termomagnéticas se normalizaron las mediciones obtenidas con el instrumento (Medidor de susceptibilidad dependiente de la temperatura MFK1-CS4) sobre el valor mínimo de cada curva. Una vez normalizadas dichas mediciones, se procedió al cálculo de la Temperatura de Curie (para minerales ferrimagnéticos) o Temperatura de Neel (para minerales antiferromagnéticos) para determinar los portadores magnéticos presentes en cada muestra. Dicho cálculo se realizó para las dos curvas, esto a partir del método de la segunda derivada de Tauxe (Tauxe *et al.*, 2010). Dicho método consiste en calcular la primera derivada de los datos ($d\kappa/dT$) para posteriormente calcular su segunda derivada ($d^2\kappa/dT^2$), el máximo de esta última se presenta en el punto de máxima curvatura de la curva termomagnética, representando así un estimado de la Temperatura de Curie e indicando así los portadores magnéticos de la misma. Este método se caracteriza por amplificar el ruido en los datos debido a las diferenciaciones realizadas, lo cual puede complicar la determinación de la Temperatura de Curie, sin embargo, en las curvas generadas se logra apreciar claramente la posición en la que se encuentra el máximo.

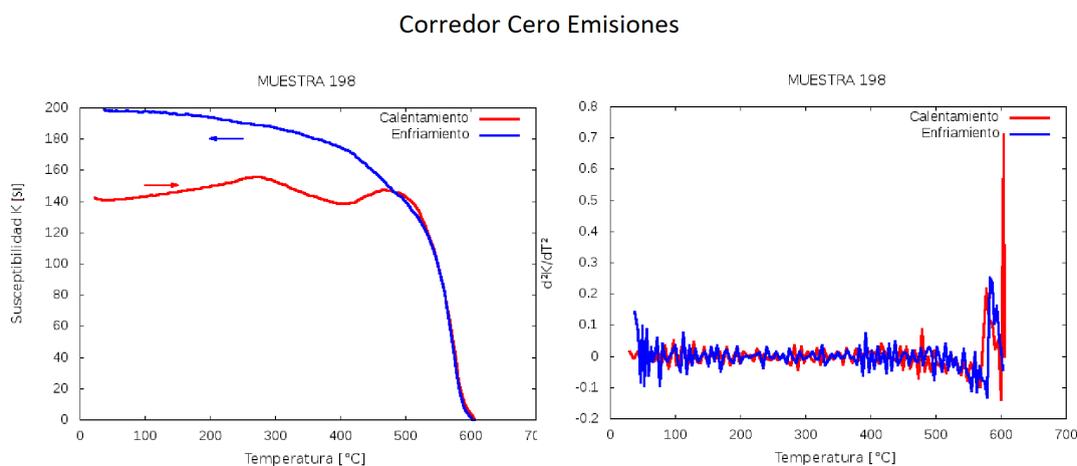


Figura 8.1: Curvas termomagnéticas de la muestra 198 ubicada en el Corredor Cero Emisiones de Eje Central. Del lado izquierdo se muestra en rojo la curva de calentamiento y en azul la de enfriamiento. Del lado derecho se presenta la gráfica de la Temperatura de Curie para ambas curvas.

La muestra 198 situada sobre el Corredor Cero Emisiones de Eje Central (fig.8.1) mues-

tra una temperatura de Curie de aproximadamente 575 °C lo cual sugiere la presencia de Magnetita como principal portador magnético en la muestra.

Las muestras 201, 255 y 357 pertenecientes al Eje 2 Oriente (fig.8.2 señalan la presencia de dos posibles portadores magnéticos, el primero de ellos correspondería a la magnetita mostrada principalmente en las dos primeras muestras con una Temperatura de Curie de aproximadamente 575 °C. El segundo portador magnético podría corresponder a la titanohematita cuya curva termomagnética característica se presenta en la curva de enfriamiento de la muestra 357, presentando un decaimiento casi lineal de la temperatura de Curie (Evans y Heller, 2003).

En lo que respecta a las muestras 222, 248, 257, 360, 370, 394 y 404, presentes en el Circuito Bicentenario, (fig.8.3) se puede observar nuevamente la presencia de magnetita en la mayoría de las muestras, siendo esto descrito en el gráfico de la segunda derivada de Tauxe, en donde la temperatura de Curie se presenta en los 580 °C. Por otro lado, las muestras 248, 370, 394 y 404 presentan un comportamiento casi lineal en las curvas de enfriamiento sugiriendo nuevamente la presencia de titanohematita en el material particulado de la vialidad.

Para las muestras 226 y 304 presentes sobre Calzada de Tlalpan (fig. 8.4) se puede observar la clara presencia de magnetita en las muestras, siendo la muestra 304 la que presenta un pico más pronunciado en los 580 °C. Aunado a lo anterior, ambas muestras describen en la curva de enfriamiento un decremento casi lineal en la temperatura por lo que nuevamente se sugiere la presencia de titanohematita en las mismas.

Finalmente, en lo referente a las muestras 249 y 371 recolectadas sobre Avenida Insurgentes (fig. 8.5) se observa el rasgo característico de la goethita con un pico muy pronunciado, a los 120 °C, en la gráfica correspondiente a la segunda derivada de Tauxe, y al mismo tiempo presentando un segundo pico alrededor de los 580 °C sugiriendo de nueva cuenta la presencia de magnetita en la muestra. La muestra 371 presenta una segunda derivada muy ruidosa, sin embargo se logra apreciar un pico muy pronunciado en los datos de la curva de calentamiento, posicionado alrededor de los 100 °C, a partir del cual puede presumirse nuevamente la presencia de goethita en el material particulado de la vialidad.

Eje 2 Oriente

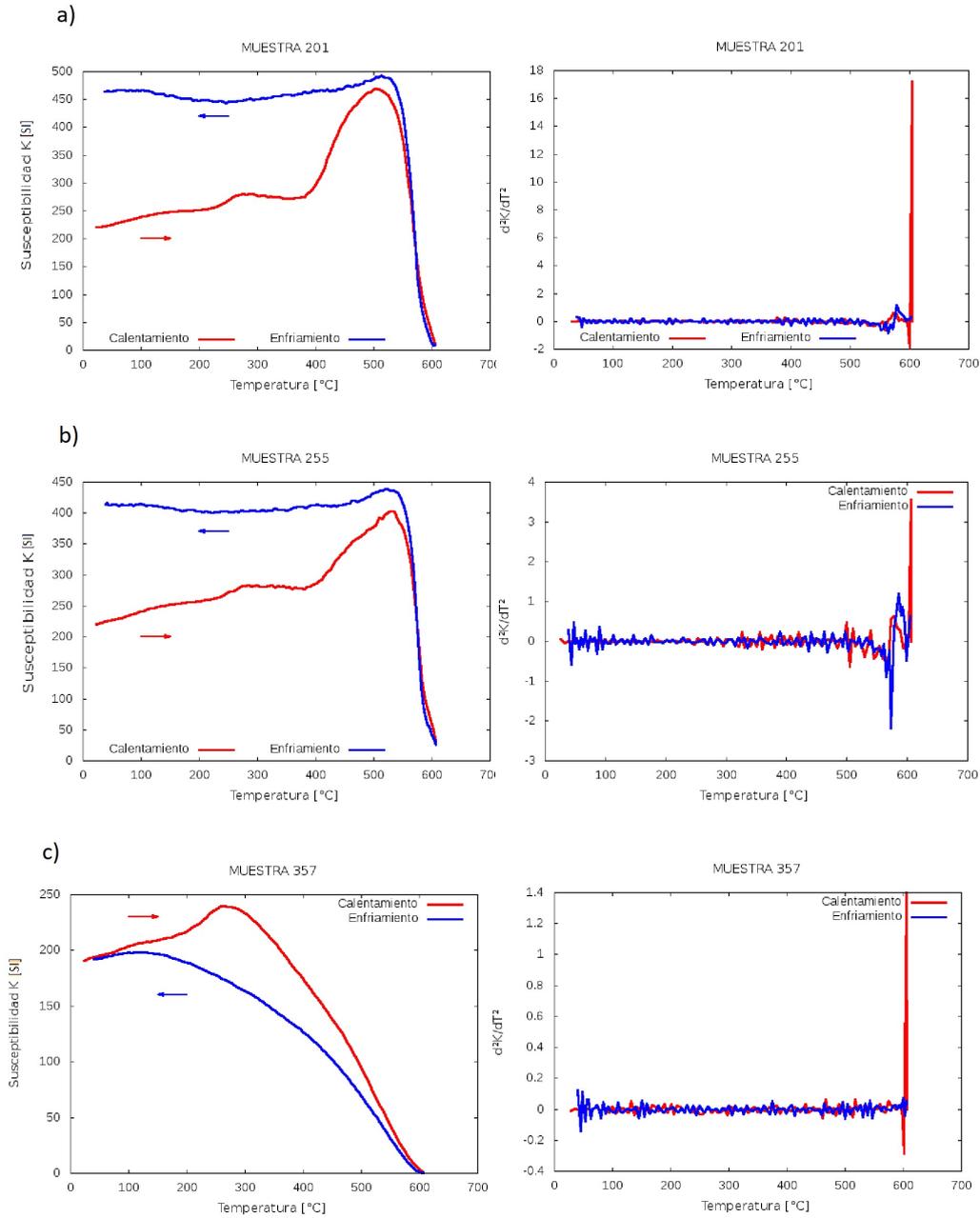


Figura 8.2: Curvas termomagnéticas de las muestras ubicadas en Eje 2 Oriente. Del lado izquierdo se muestra en rojo la curva de calentamiento y en azul la de enfriamiento. Del lado derecho se presenta la gráfica de la Temperatura de Curie para ambas curvas.

Circuito Bicentenario

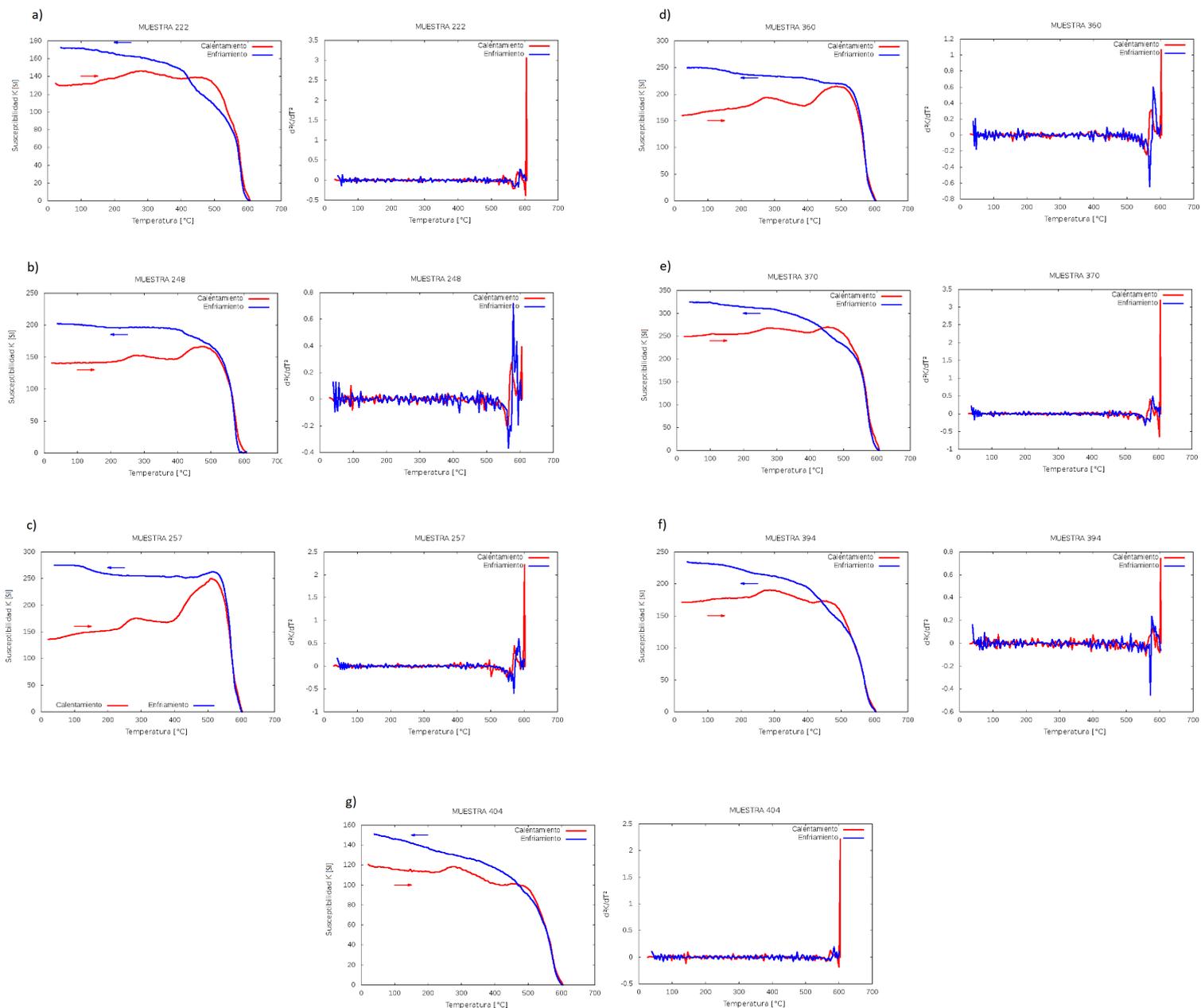


Figura 8.3: Curvas termomagnéticas de las muestras ubicadas en Circuito Bicentenario. Del lado izquierdo se muestra en rojo la curva de calentamiento y en azul la de enfriamiento. Del lado derecho se presenta la gráfica de la Temperatura de Curie para ambas curvas.

Calzada de Tlalpan

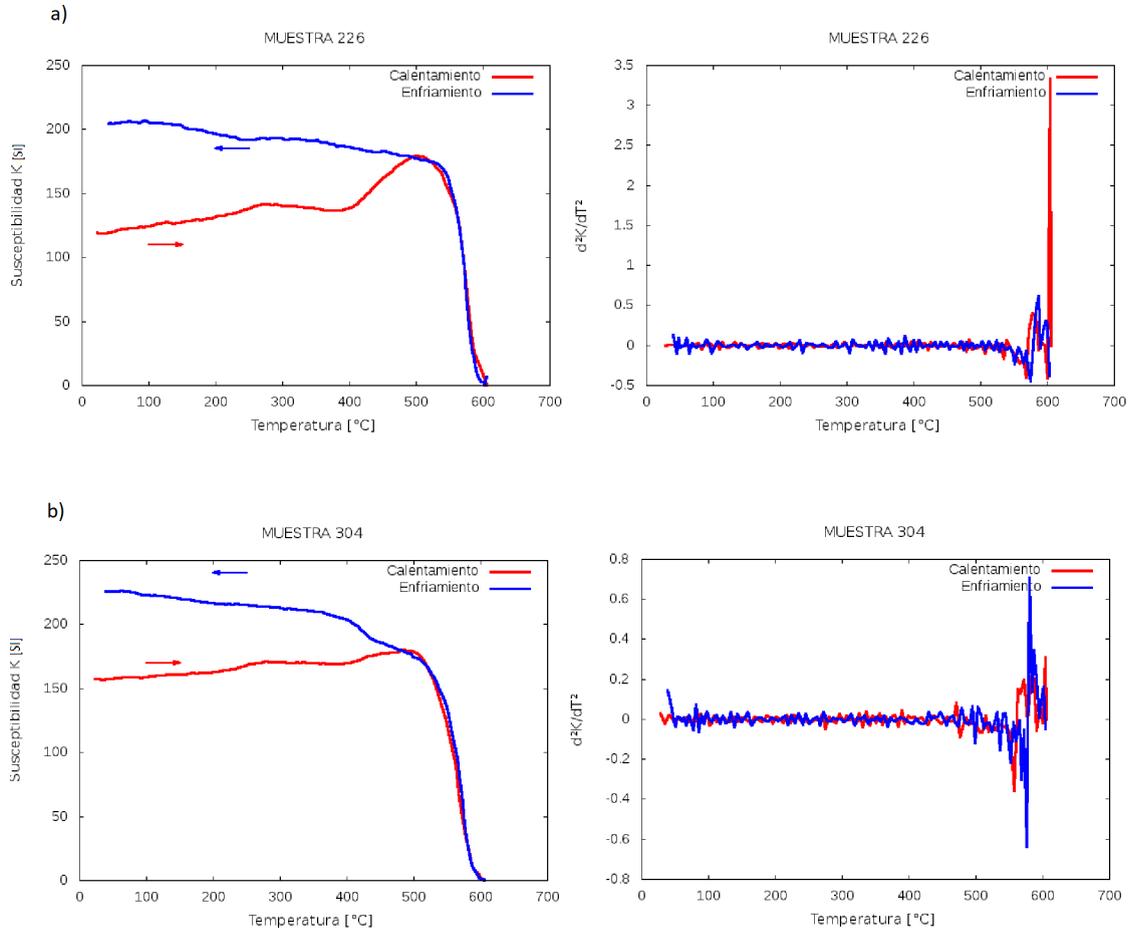


Figura 8.4: Curvas termomagnéticas de las muestras ubicadas sobre Calzada de Tlalpan. Del lado izquierdo se muestra en rojo la curva de calentamiento y en azul la de enfriamiento. Del lado derecho se presenta la gráfica de la Temperatura de Curie para ambas curvas.

Avenida Insurgentes

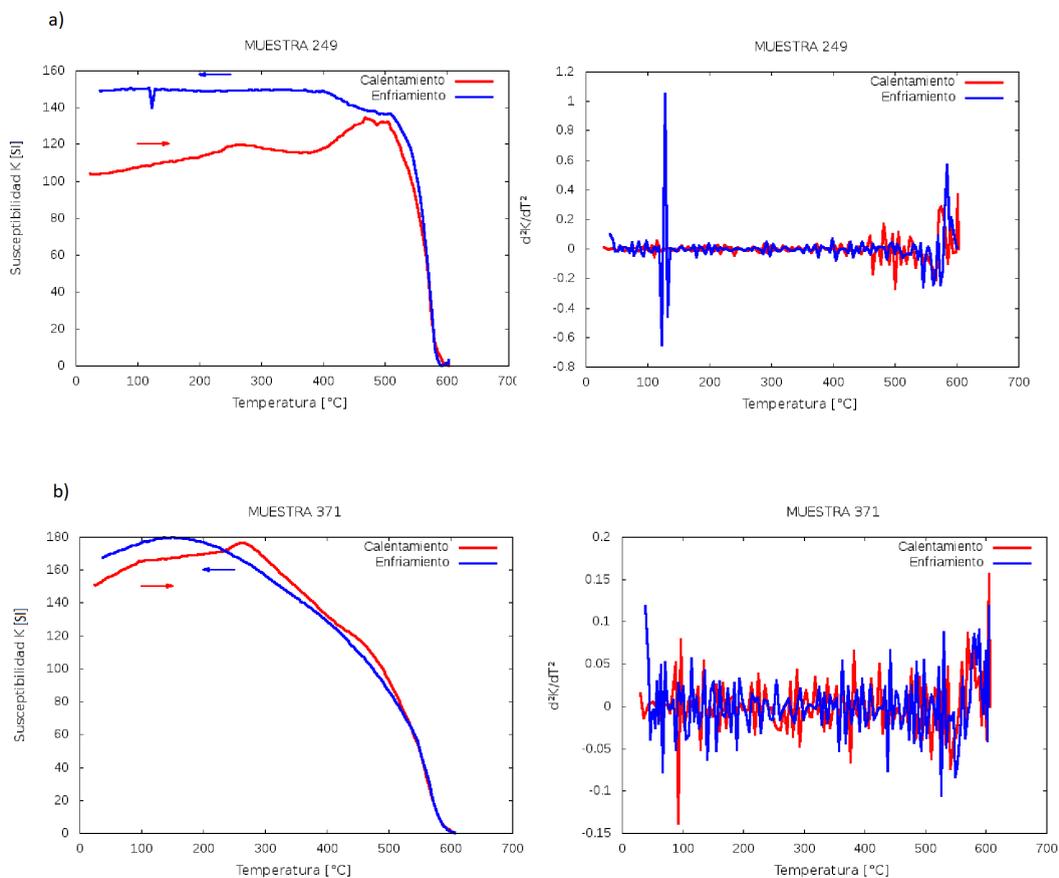


Figura 8.5: Curvas termomagnéticas de las muestras ubicadas sobre Avenida Insurgentes. Del lado izquierdo se muestra en rojo la curva de calentamiento y en azul la de enfriamiento. Del lado derecho se presenta la gráfica de la Temperatura de Curie para ambas curvas.

8.2. Susceptibilidad Magnética Específica.

Esta susceptibilidad se obtuvo al dividir los valores medidos de susceptibilidad magnética volumétrica a baja frecuencia (976 [Hz]) entre la densidad de cada muestra. Dicho parámetro nos permitirá identificar la facilidad con la que las muestras pueden adquirir magnetización al ser expuestas a un campo magnético. En este sentido los valores más elevados en este parámetro corresponderán a muestras que contienen elementos y minerales ferrimagnéticos y ferromagnéticos capaces de adquirir magnetización con facilidad.

Tomando en cuenta todas las muestras analizadas, el valor máximo de susceptibilidad magnética específica fue de $1.64 \times 10^{-5} [m^3/kg]$ mismo que pertenece a la muestra 325 ubicada sobre Eje 2 Oriente. La muestra con valor mínimo fue la número 424, cuyo valor es de $2 \times 10^{-6} [m^3/kg]$, y se encuentra ubicada nuevamente sobre Eje 2 Oriente. El valor promedio de susceptibilidad magnética específica fue de $3.98 \times 10^{-6} [m^3/kg]$ como se muestra en la tabla 8.2.

Porcentaje de k_{df} y Susceptibilidad Magnética Específica				
Segmento	$K_{df1} \%$	$K_{df2} \%$	$K_{df3} \%$	$\chi [m^3/kg]$
Máx.	2.341137124	7.725752508	5.51369863	1.64384E-05
Mín.	0	1.428571429	0.847457627	2.00319E-06
Prom.	0.554544874	3.118786189	2.581844885	3.98131E-06

Tabla 8.2: Valor máximo, mínimo y promedio del porcentaje de susceptibilidad dependiente de la frecuencia y Susceptibilidad Magnética Específica.

En el perfil correspondiente a Calzada de Tlalpan (fig.8.6), se muestran variaciones importantes de la Susceptibilidad Magnética Específica. Los valores más elevados de este parámetro se presentan en las muestras 77, 226 y 279, mismas que se posicionan muy cerca de intersecciones viales complicadas como lo es el cruce entre Calzada de Tlalpan y General Emiliano Zapata (muestra 226) y la intersección Calzada de Tlalpan-Primero de Mayo (muestra 279). El valor máximo se encuentra en la muestra 77, misma que se ubica en el cruce entre Calzada de Tlalpan y Anillo Periférico, caracterizado por alta afluencia vehicular. En este sentido

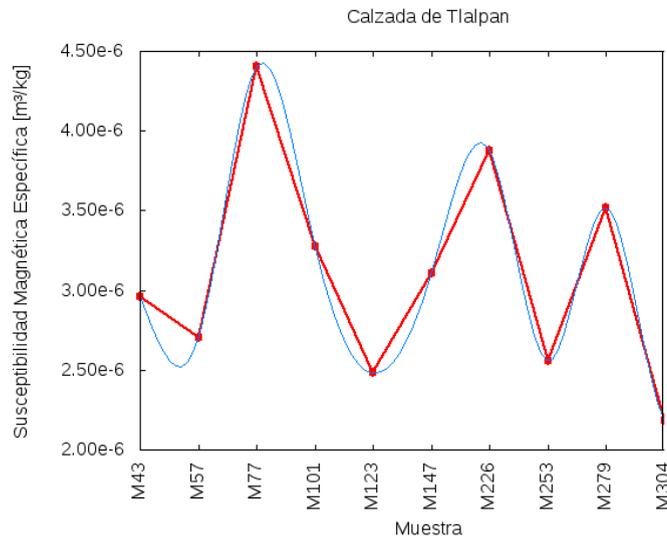


Figura 8.6: Comportamiento de la Susceptibilidad Magnética Específica a lo largo de Calzada de Tlalpan.

se puede suponer que el material presente en estos cruces se magnetiza fácilmente, es decir, posee mayor cantidad de minerales ferrimagnéticos que el polvo urbano del resto de la calzada.

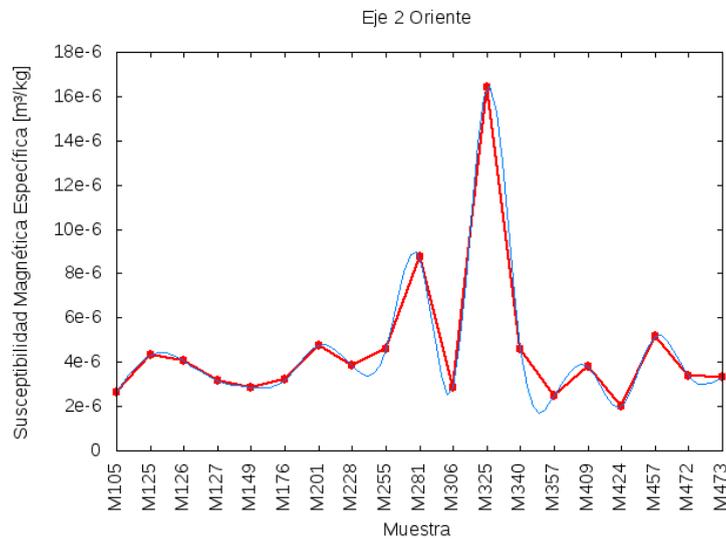


Figura 8.7: Comportamiento de la Susceptibilidad Magnética Específica a lo largo de Eje 2 Oriente.

Por otro lado, el perfil correspondiente a Eje 2 Oriente (fig. 8.7), indica su máximo en la muestra 325, localizada a unos metros del cruce entre esta vialidad y Viaducto Río Piedad, lo cual sugiere que en este cruce la concentración de minerales ferrimagnéticos es mayor a la del resto del eje. Algo similar se presenta en el perfil de Avenida Insurgentes (fig. 8.8), en el que el

valor más elevado se observa en la muestra 438 ubicada a unos metros de la intersección entre dicha vialidad y Avenida Fortuna. Los cruces antes mencionados presentan gran afluencia vehicular la mayor parte del día, por lo que los valores de este parámetro podrían significar que en cruces muy transitados el material particulado se magnetiza con mayor facilidad que en el resto de la vialidad, indicando mayor presencia de minerales ferrimagnéticos en los mismos.

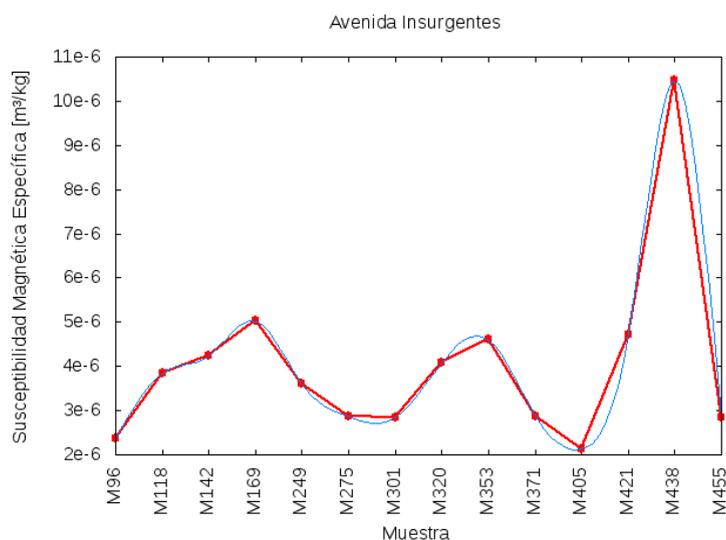


Figura 8.8: Comportamiento de la Susceptibilidad Magnética Específica a lo largo de Avenida Insurgentes.

En el caso de las muestras ubicadas sobre Corredor Cero Emisiones de Eje Central (fig. 8.9), se puede observar que la mayoría de los valores del perfil no son mayores a 4×10^{-6} [m³/kg]. Sin embargo, la excepción a esto se encuentra en la muestra 406 que posee el máximo valor de Susceptibilidad Magnética Específica de la vialidad con 14×10^{-6} [m³/kg]. Esta muestra fue recolectada a unos metros del cruce entre Eje Central y Circuito Bicentenario, mismo que, de acuerdo con los valores mencionados, posee mayor cantidad de minerales ferrimagnéticos que el polvo urbano presente en el resto del Corredor Cero Emisiones de Eje Central.

En el caso del perfil correspondiente a Circuito Bicentenario (fig.8.10), se observa que la mayoría de las muestras no exceden los 5×10^{-6} [m³/kg], pese a que se presentan distintas fluctuaciones a lo largo del perfil. El valor máximo de Susceptibilidad Magnética Específica de la vialidad se encuentra en la muestra 343, la cual fue recolectada cerca del cruce entre Circuito Bicentenario y la Calzada Ignacio Zaragoza. Esta intersección presenta gran tránsito

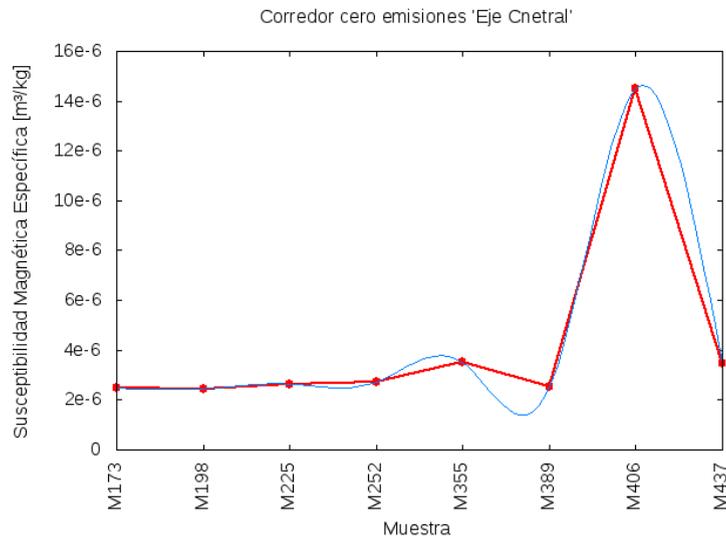


Figura 8.9: Comportamiento de la Susceptibilidad Magnética Específica a lo largo del Corredor Cero Emisiones de Eje Central.

vehicular y se ubica en las inmediaciones del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, por lo que se esperaría que, en efecto, tuviera el mayor valor de este parámetro y por consiguiente mayor cantidad de minerales ferrimagnéticos que el resto del polvo urbano de la vialidad.

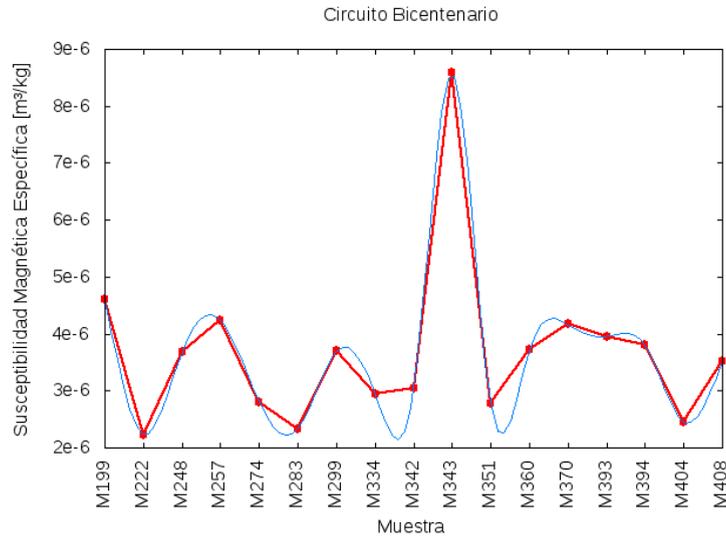


Figura 8.10: Comportamiento de la Susceptibilidad Magnética Específica a lo largo de Circuito Bicentenario.

8.3. Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia

Para poder obtener los valores del porcentaje de susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia de cada muestra fue necesario aplicar la ecuación 8.1. En un primer caso, se tomaron como mediciones a baja frecuencia, las correspondientes a 976 [Hz] y como las de alta frecuencia las de 3904 [Hz]. En un segundo caso, se tomaron nuevamente como mediciones a baja frecuencia las efectuadas a 976 [Hz] y como alta frecuencia las de 15616 [Hz] Para el último caso, se consideraron a las mediciones realizadas a 3904 [Hz] como las de baja frecuencia y a las realizadas a 15616 [Hz] como de alta frecuencia.

$$\kappa_{fd} \% = [(\kappa_{lf} - \kappa_{hf}) / \kappa_{lf}] \times 100 \quad (8.1)$$

Este porcentaje permite identificar la presencia de minerales superparamagnéticos ultrafinos (menores a 0.03 [μm]), así como su concentración. De esta manera, las muestras que presenten un porcentaje menor al 2% presentarán una concentración baja o casi nula de granos superparamagnéticos, las que se encuentren entre el 2 y el 10% tendrán una concentración media, las que comprendan porcentajes entre 10 y 14% señalarán concentraciones altas, y finalmente, los porcentajes mayores a 14% indicarán una medición errónea (Dearing,

1999).

Tomando en cuenta los criterios anteriores, se elaboró un mapa temático de este parámetro para cada porcentaje calculado (Figuras 8.11, 8.12, 8.13).

En el mapa construido a partir de los valores de susceptibilidad medidos a 976 [Hz] y 3904 [Hz] (fig.8.11), se observa que la mayoría de las muestras presentan una concentración baja de minerales superparamagnéticos ultrafinos, aseveración que puede ser complementada con el análisis de los otros porcentajes calculados.

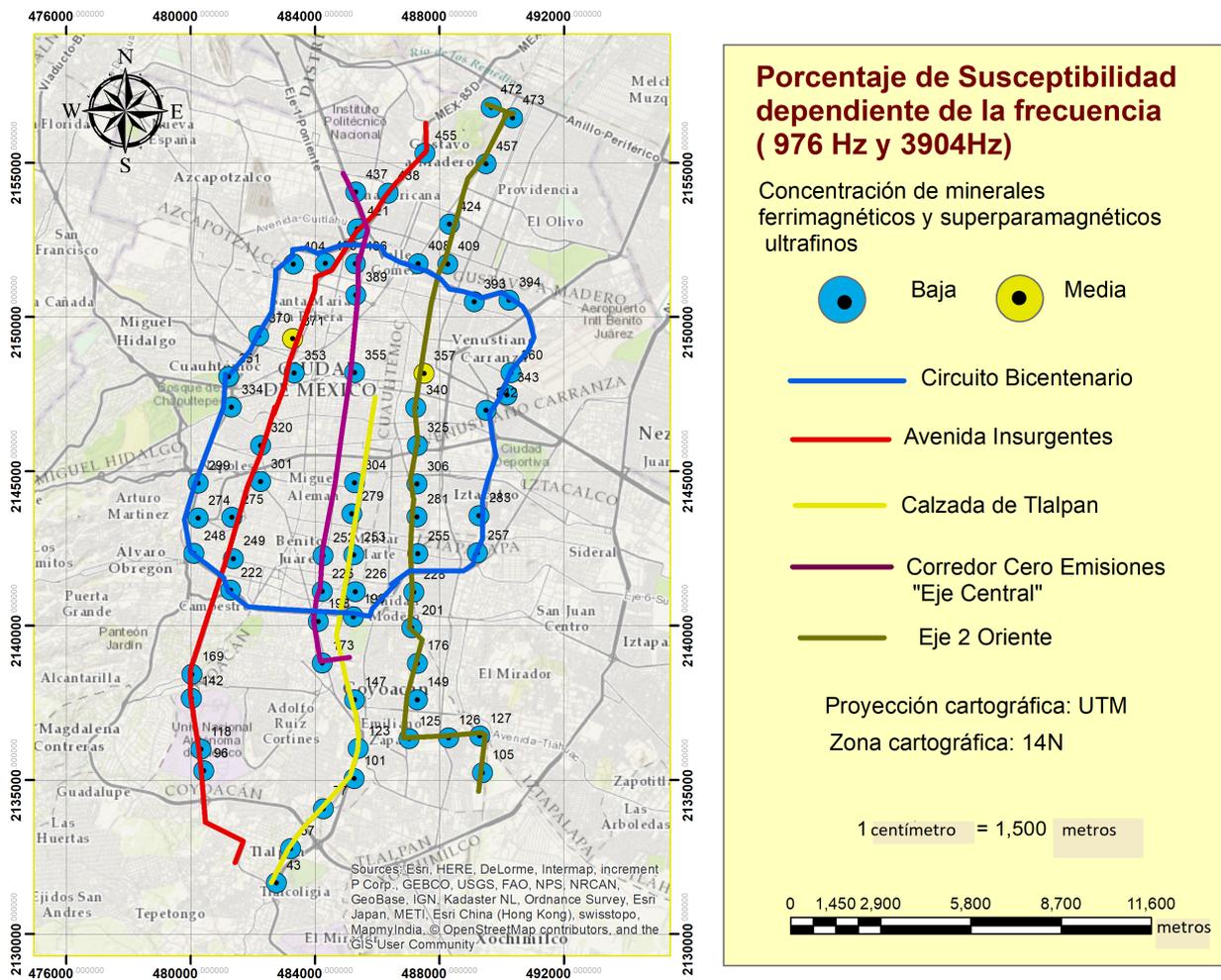


Figura 8.11: Mapa de Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia (976 Hz y 3904 Hz).

Por otro lado, el mapa obtenido al emplear las mediciones de susceptibilidad realizadas a 3904 [Hz] y 15616 [Hz] (fig.8.12), señala a la mayoría de las muestras de polvo urbano con concentraciones medias de minerales superparamagnéticos ultrafinos (entre 2 y 10 %). La

calzada de Tlalpan, es la avenida que posee sólo una muestra con concentración baja.

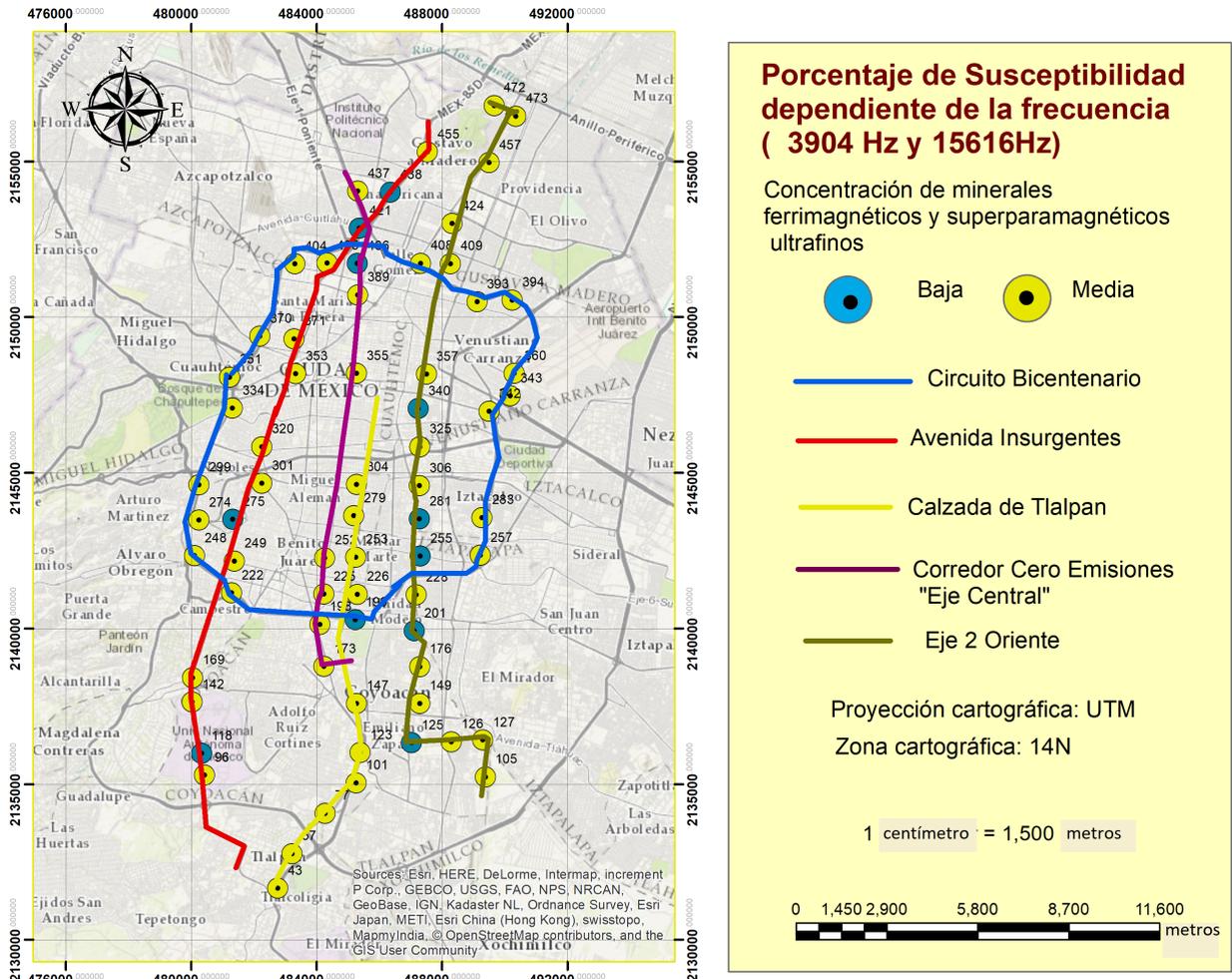


Figura 8.12: Mapa del Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia (3904 Hz. y 15616 Hz.)

En el mapa del Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia, obtenido a partir de las frecuencias de 976 y 15616 [Hz] (fig.8.13), se observa que la mayoría de las muestras presentan una concentración media de minerales superparamagnéticos ultrafinos, pues presentan un porcentaje comprendido entre 2 y 10 %. Esto se presenta también en el mapa anterior, por lo que puede presumirse que, en efecto, la mayoría de las muestras analizadas, poseen una concentración media de minerales superparamagnéticos ultrafinos mezclados con granos gruesos, mismos que pueden ser generados a partir de la quema de combustibles fósiles.

Por otra parte, en las figuras 8.17, 8.16, 8.18, 8.15 y 8.14 se muestran los perfiles de este

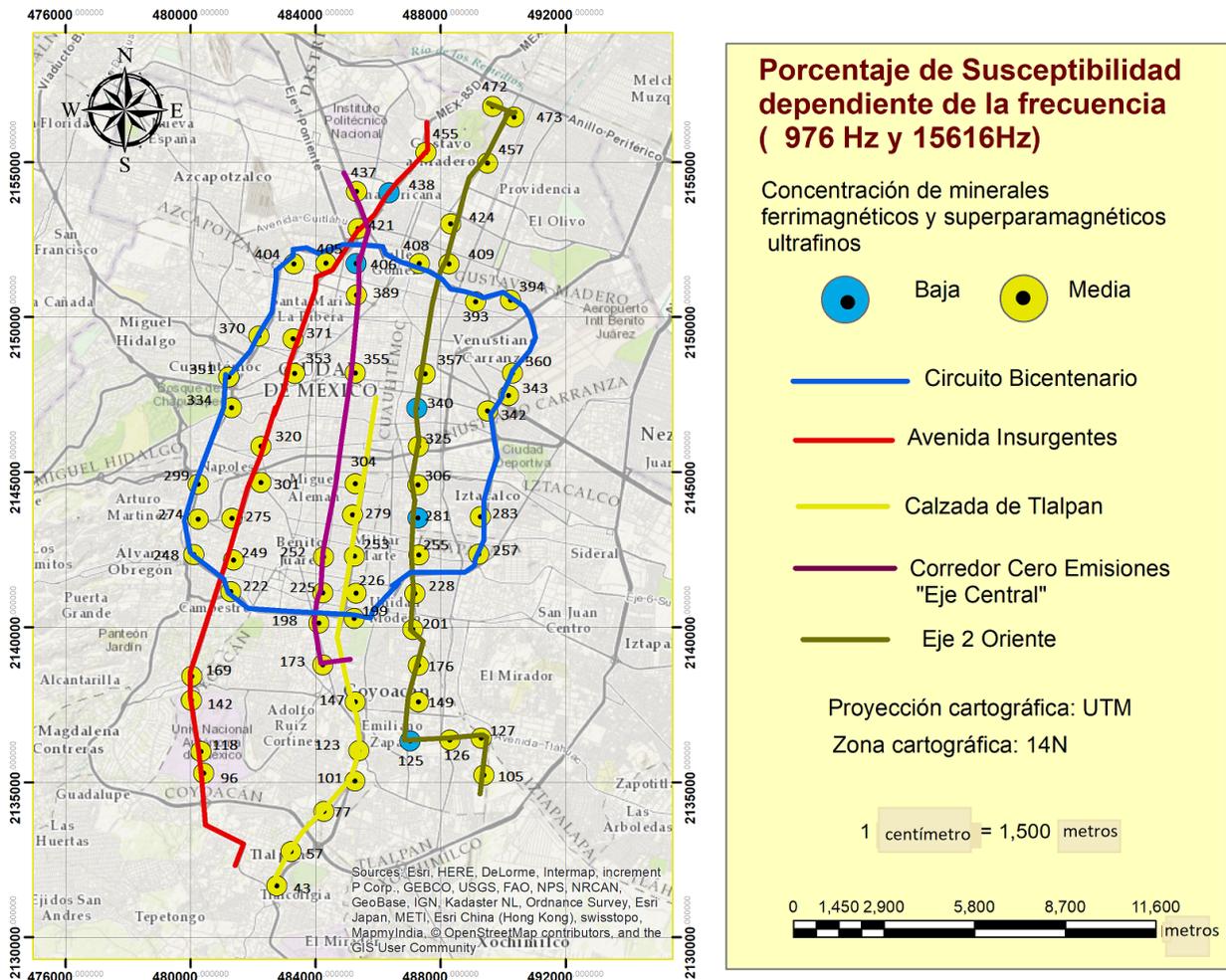


Figura 8.13: Mapa del Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia (976 [Hz] y 15616 [Hz]).

parámetro construidos con base en las muestras recolectadas en cada avenida.

Para el caso de Calzada de Tlalpan (fig.8.14), se puede observar que los tres porcentajes de susceptibilidad dependiente de la frecuencia, describen un comportamiento similar. Para las mediciones realizadas a 976 [Hz]-15616 [Hz] y 3904 [Hz]-15616 [Hz] las muestras 57 y 147 presentan los mayores valores en este parámetro y se ubican en los segmentos sur y centro de la vialidad, respectivamente. Lo anterior difiere de lo que se presenta en el perfil correspondiente a los valores obtenidos con las frecuencias 976 [Hz] y 3904 [Hz] (fig.8.14a) ya que en él las muestras con los valores más elevados son la 43 y la 253. Esta variación puede ser debida a que el rango de frecuencias empleado en esta última medición es reducido, e impide un análisis de muestreo a mayor detalle.

Los valores mostrados en los perfiles 'b' y 'c' de la figura 8.14 sugieren que todas las muestras recolectadas sobre Calzada de Tlalpan presentan una concentración media de minerales superparamagnéticos ultrafinos; mientras que los valores del perfil 'a' de la misma figura representarían una concentración casi nula de los mismos, esto debido nuevamente al rango de frecuencias empleado para la construcción de dicho perfil.

En lo que respecta a Avenida Insurgentes (fig.8.15), los tres porcentajes calculados describen un comportamiento semejante. De acuerdo con los perfiles 'b' y 'c' de dicha figura, la mayoría las muestras recolectadas a lo largo de la vialidad presentan una concentración media de granos superparamagnéticos ultrafinos puesto que los porcentajes calculados se encuentran, en su mayoría, entre 2% y 10%. Lo anterior no se aprecia en el perfil de la figura 8.15a, ya que en éste, la única muestra que presenta un valor de concentración media es la número 371. La diferencia entre lo descrito en dichos perfiles está relacionada nuevamente al detalle proporcionado por el rango de frecuencias utilizado en las mediciones.

De la misma manera, se observa que la muestra 371, ubicada en el segmento norte de la vialidad, es la que presenta el valor máximo para los tres perfiles y fue recolectada a unos metros de la intersección entre Paseo de la Reforma y Avenida Insurgentes. La siguiente muestra con mayor porcentaje es la número 301 localizada muy cerca del cruce entre Avenida Insurgentes y Viaducto Miguel Alemán. La ubicación de ambas muestras sugiere que en cruces complicados, como los mencionados, el material particulado de las vialidades presentará una mayor concentración de minerales superparamagnéticos ultrafinos.

En el caso del Corredor Cero Emisiones 'Eje Central' (fig.8.16), se observa que los perfiles de los tres porcentajes calculados, y obtenidos a partir de distintos rangos de frecuencia, presentan un comportamiento estrechamente similar. Para los perfiles obtenidos a partir de las mediciones a 976[Hz]-15616[Hz] y 3904[Hz]-15616[Hz], la mayoría de las muestras recolectadas presentan una concentración media de minerales superparamagnéticos ultrafinos, siendo la muestra 406 la única que presenta una concentración casi nula de los mismos. Nuevamente se observa que para el perfil obtenido a partir de las mediciones realizadas a 976[Hz]-3904[Hz], todas las muestras señalan porcentajes inferiores al 2% y por ende, concentraciones muy bajas.

Para esta vialidad la mayor concentración se obtuvo en la muestra 389, ubicada en el segmento norte de la vialidad muy cerca del cruce entre Eje Central y la Avenida Ricardo

Flores Magón. Así mismo, la muestra 225 presenta un valor importante en este porcentaje y fue recolectada a unos metros de la intersección entre la avenida General Emiliano Zapata y Eje Central. Los porcentajes calculados en ambas muestras superan el 3%, valor entendido como concentración media de minerales superparamagnéticos ultrafinos, mismos que se explican debido a los cruces con vialidades altamente transitadas al norte y sur de la ciudad.

Por otro lado, los perfiles correspondientes a Circuito Bicentenario (fig.8.17) también describen un comportamiento similar entre sí. Los perfiles 'b' y 'c' de esta vialidad señalan que, para casi todas sus muestras, los valores de este parámetro superan el 2% e indican una concentración media de minerales superparamagnéticos ultrafinos en la mayor parte de la vialidad; siendo la muestra 199 del perfil 'c' la única que presenta una concentración casi nula. Aunado a lo anterior, y pese a que presenta un comportamiento similar a los anteriores, el perfil 'a' no señala ninguna muestra con porcentajes superiores al 2%, sugiriendo nuevamente que el rango de frecuencias seleccionado para las mediciones es de gran importancia para los resultados del análisis.

En los tres perfiles destacan las muestras 334 y 343 como las muestras con valores más elevados en este porcentaje. Ambas muestras se encuentran muy cerca del cruce entre Circuito Bicentenario y la Calzada Ignacio Zaragoza. Esta intersección presenta gran tránsito vehicular y se ubica en las inmediaciones del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, por lo que en efecto se esperaría un incremento en los valores de este porcentaje con respecto al resto del perfil.

Los perfiles correspondientes al Eje 2 Oriente (fig.8.18), describen un comportamiento altamente semejante para los tres tipos de porcentaje calculados. La mayoría de las muestras de los perfiles 'b' y 'c' presentan concentraciones medias de minerales superparamagnéticos ultrafinos, y ambos señalan concentraciones bajas de los mismos en las muestras 340, 281 y 125. Así mismo, el perfil construido a partir de las mediciones realizadas a 976[Hz]-3904[Hz] describe nuevamente el mismo comportamiento que los anteriores pero solo presenta porcentajes superiores al 2% en las muestras 357 y 424.

Son justamente estas dos últimas muestras las que presentan los mayores porcentajes en los tres perfiles. Es en el perfil 'b' (fig.8.18b) en el que la muestra 357 tiene un valor de 8% y la muestra 424 alcanza el 7%, siendo estos los máximos porcentajes obtenidos en los tres perfiles. Ambas muestras se recolectaron en la zona norte de la ciudad, la primera se ubicó a

unos metros del cruce entre Eje 2 Oriente y Calzada San Juan de Aragón, y la segunda se recolectó en las inmediaciones de la colonia Morelos, ambas zonas de gran afluencia vehicular.

Tomando en cuenta los perfiles de todas las vialidades, el mayor valor obtenido en el cálculo del parámetro corresponde a la muestra 357 ubicada sobre el Eje 2 Oriente (fig.8.18b) en los alrededores de la zona Centro de la ciudad. Dicho valor se puede identificar en la tabla 8.2.

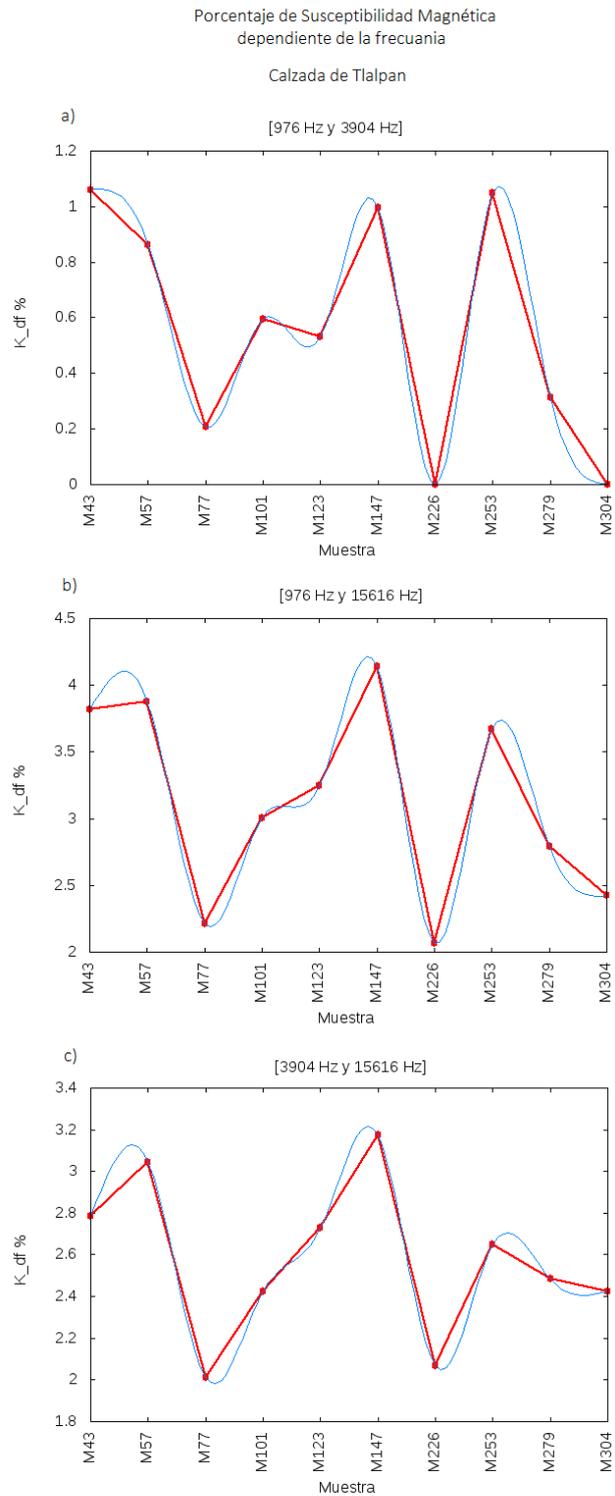


Figura 8.14: Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia para Calzada de Tlalpan. a) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 976 [Hz] y 3904 [Hz], b) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 976 [Hz] y 15616 [Hz], c) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 3904 [Hz] y 15616 [Hz]

Porcentaje de Susceptibilidad Magnética
dependiente de la frecuencia

Avenida Insurgentes

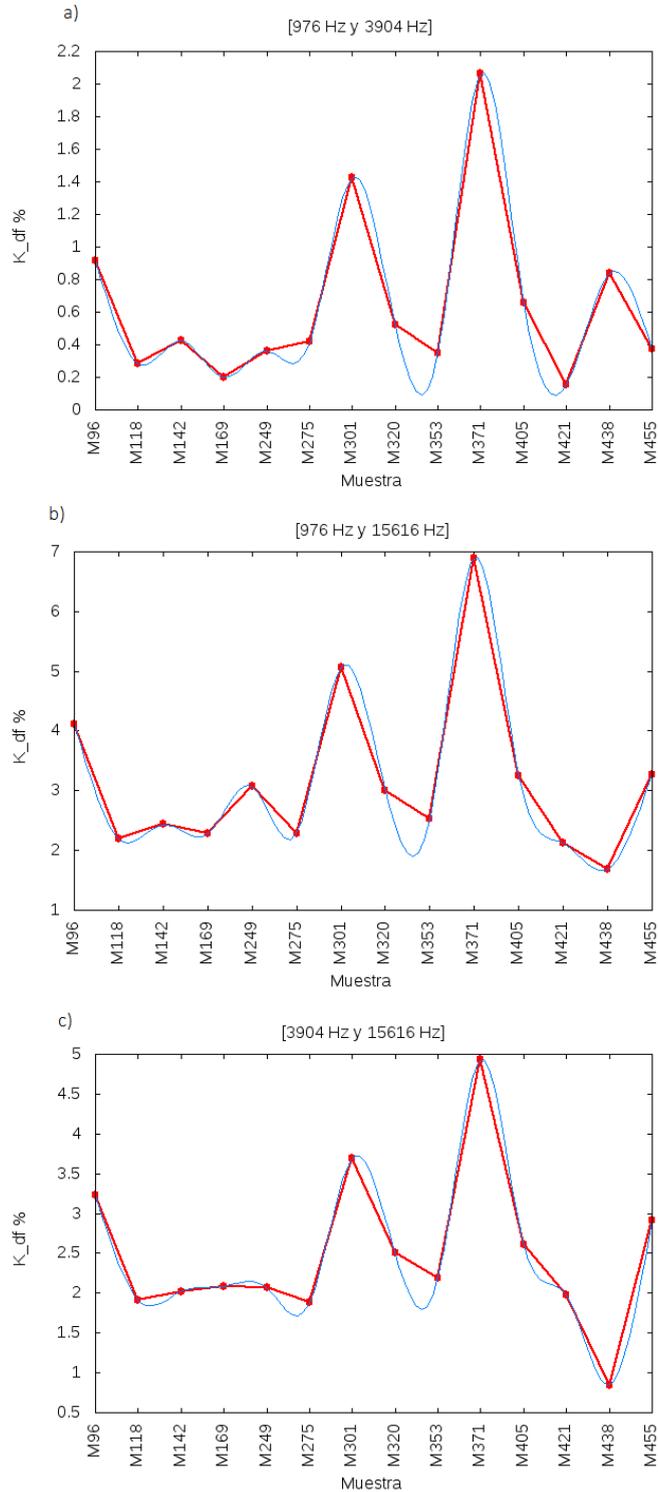


Figura 8.15: Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia para Avenida Insurgentes. a) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 976 [Hz] y 3904 [Hz], b) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 976 [Hz] y 15616 [Hz], c) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 3904 [Hz] y 15616 [Hz]

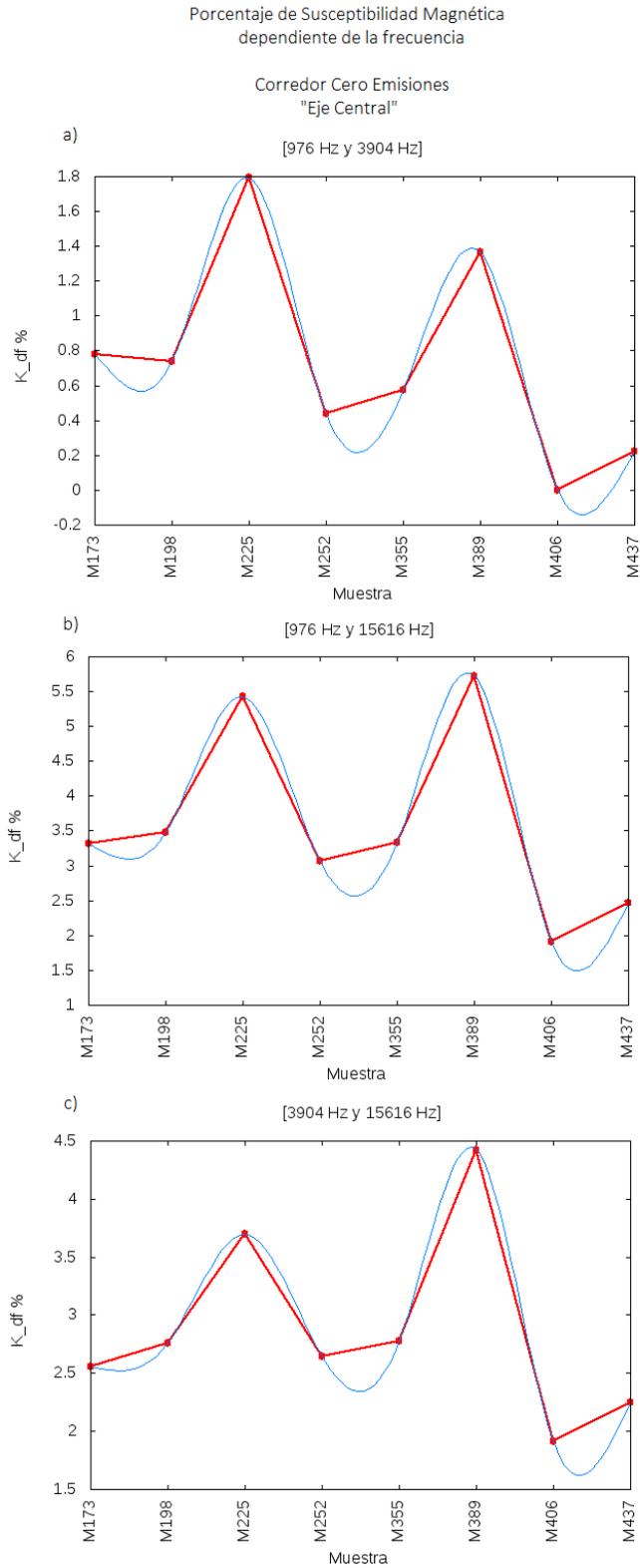


Figura 8.16: Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia para Corredor Cero Emisiones de Eje Central. a) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 976 [Hz] y 3904 [Hz], b) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 976 [Hz] y 15616 [Hz], c) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 3904 [Hz] y 15616 [Hz]

Porcentaje de Susceptibilidad Magnética
dependiente de la frecuencia

Circuito Bicentenario

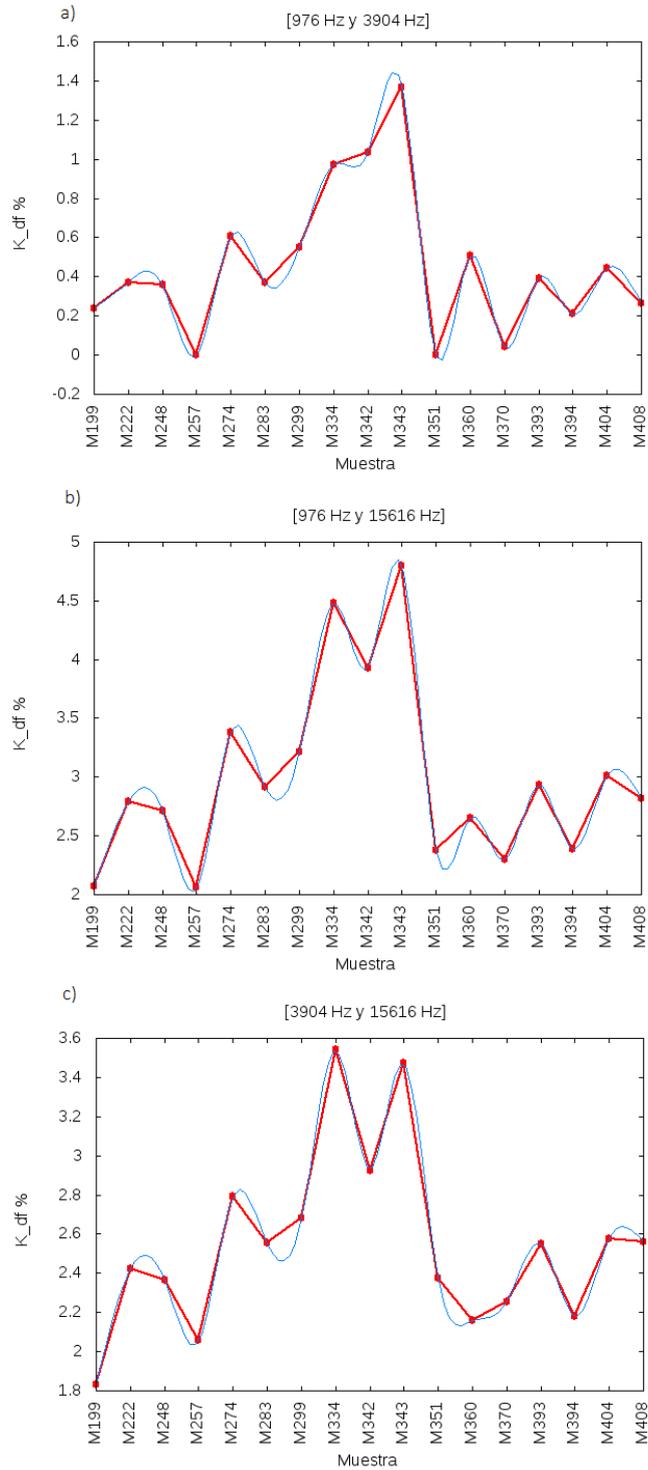


Figura 8.17: Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia para Circuito Bicentenario. a) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 976 [Hz] y 3904 [Hz], b) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 976 [Hz] y 15616 [Hz], c) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 3904 [Hz] y 15616 [Hz]

Porcentaje de Susceptibilidad Magnética
dependiente de la frecuencia

Eje 2 Oriente

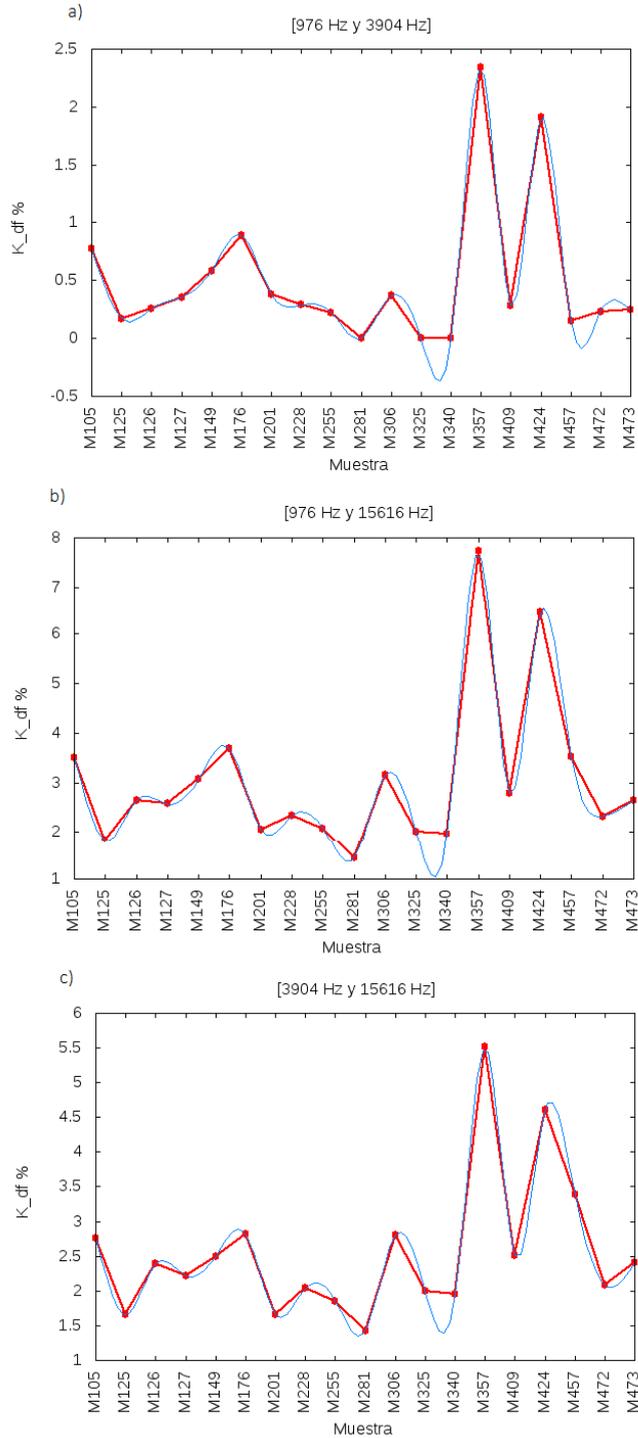


Figura 8.18: Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia para Eje 2 Oriente. a) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 976 [Hz] y 3904 [Hz], b) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 976 [Hz] y 15616 [Hz], c) Porcentaje obtenido a partir de las mediciones realizadas a 3904 [Hz] y 15616 [Hz]

8.4. Magnetización Remanente (Natural, Anhisterética e Isothermal)

Para poder trabajar con las mediciones de Magnetización Remanente, fue necesario que, una vez calculado el módulo de cada una de ellas, se procediera a normalizar dicho valor por la densidad de la muestra. Por esta razón, todos los valores de Magnetización Remanente empleados en este análisis poseen dicha característica.

Los perfiles de Magnetización Remanente Natural de cada vialidad presentan, para la mayoría de ellas, los valores máximos en muestras recolectadas en los últimos segmentos de las mismas. Tal es el caso de Calzada de Tlalpan (fig.8.19a), cuyo valor máximo se encuentra en la muestra 226 ubicada a unos metros de la intersección entre dicha calzada y la avenida General Emiliano Zapata. En el caso de Avenida Insurgentes (fig.8.20a) la muestra que presenta el mayor valor es la número 405, misma que se ubica en los alrededores del cruce entre Avenida Insurgentes y Circuito Bicentenario. De la misma manera, el perfil descrito por las muestras recolectadas en Eje central (fig.8.21a), presenta una tendencia clara de crecimiento en el último segmento de la vialidad, siendo el valor máximo el de la muestra 437 recolectada a unos metros de la intersección entre Eje Central y Avenida Ing. Alfredo Robles Domínguez. Esta tendencia puede suponer, que el material particulado de los cruces viales con alta afluencia vehicular en la zona norte de la ciudad, presenta mayores valores de Magnetización Remanente Natural que el resto del polvo urbano de la vialidad.

Por otro lado, Eje 2 Oriente (fig.8.22a) muestra variaciones importantes a lo largo de la vialidad, presentando los mayores valores en las muestras 127 y 325, mismas que se ubican a unos metros de los cruces Eje 2 Oriente-Avenida Tláhuac y Eje 2 Oriente-Viaducto Río de la Piedad, ambos de gran afluencia vehicular. Circuito Bicentenario (fig.8.23a) es la vialidad que presenta un comportamiento casi constante, si no fuera por el máximo que se observa en la muestra 343, misma que corresponde al valor más elevado de Magnetización Remanente Natural de todas las vialidades (Tabla 8.3). Esta muestra se recolectó a unos metros del cruce entre Calzada Ignacio Zaragoza y Circuito Bicentenario, muy cerca del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México; por lo que se presume que el polvo urbano de esta zona adquiere MRN con mayor facilidad que el del resto de la vialidad.

En lo que respecta a los perfiles de Magnetización Remanente Anhisterética se observa que para el caso de Calzada de Tlalpan (fig.8.19b) existen fluctuaciones a lo largo de todo el perfil sin sugerir una tendencia clara. Las muestras que presentan mayores valores de esta magnetización son la 101, 147, y 279, mismas que superan los 900×10^{-6} [Am^2/kg]. Estas tres muestras, fueron recolectadas muy cerca de las intersecciones entre Calzada de Tlalpan y Avenida División del Norte, Calzada Tasqueña y Ramos Millán respectivamente. Dichas intersecciones presentan gran afluencia vehicular, por lo que se puede sugerir que los cruces 'complicados' de cada vialidad presentarán valores más elevados de Magnetización Remanente Anhisterética y que el material particulado depositado en los mismos se compone de minerales de granulometría menor a la del polvo urbano del resto de la vialidad. Lo anterior se basa en el hecho de que las partículas pequeñas adquieren una Magnetización Remanente Anhisterética con mayor facilidad.

En el caso de Avenida Insurgentes (fig.8.20b), el perfil de Magnetización Remanente Anhisterética señala que, para las muestras ubicadas en la primera mitad de la vialidad (zona sur) los valores del parámetro se encuentran por debajo de 1×10^{-3} [Am^2/kg]. Sin embargo, la segunda mitad de la vialidad (zona norte) exhibe mayores fluctuaciones en las muestras recolectadas, siendo la muestra 320 la que presenta el valor más elevado con 1.60×10^{-3} [Am^2/kg], seguida por las muestras 371 y 438 que se aproximan a un valor de 1.18×10^{-3} [Am^2/kg]. Estas muestras se ubican en los cruces entre Avenida Insurgentes y Avenida Baja California, Avenida Rivera de San Cosme y Avenida Euzkaro, intersecciones que se caracterizan por su gran afluencia vehicular. De lo anterior, se puede suponer que el segmento sur de la vialidad presenta material ferrimagnético de granulometría mayor a la del resto de la vialidad.

El perfil correspondiente al Corredor Cero Emisiones 'Eje Central' (fig.8.21b) señala valores inferiores a 1×10^{-3} [Am^2/kg] en el segmento sur de la vialidad (zona sur de la ciudad), mientras que en el segmento norte de la misma las muestras 355 y 406 presentan los valores más elevados de Magnetización Remanente Anhisterética, mismos que se aproximan a 1.60×10^{-3} [Am^2/kg]. La muestra 355 se ubica a unos metros del cruce entre Eje Central y Avenida Hidalgo, mientras que la muestra 406 se recolectó muy cerca del cruce entre Eje Central y Calzada Vallejo; razón por la cual se presume nuevamente que los cruces de gran afluencia vehicular presentan material particulado de granulometría magnética menor a la

del resto de la vialidad.

Por otra parte, el perfil generado a partir de las muestras recolectadas en Eje 2 Oriente (fig.8.22b) presenta grandes variaciones a lo largo de la vialidad. La mayoría de las muestras se posicionan por debajo de los $800 \times 10^{-6} [Am^2/kg]$; sin embargo, las muestras 176, 281, 325, 424 y 457 son las que presentan los mayores valores de Magnetización Remanente Anhisterética posicionándose entre un rango de $900 \times 10^{-6} [Am^2/kg]$ y $975 \times 10^{-6} [Am^2/kg]$. Dichas muestras se ubican a unos metros de los cruces entre Eje 2 Oriente y Avenida Río Churubusco, Avenida Canal de Apatlaco, Viaducto Río Piedad, Calzada San Juan de Aragón y Oriente 157, respectivamente. Nuevamente estos cruces se caracterizan por ser de difícil tránsito, por lo que se reafirma la relación entre esta característica y la presencia de partículas magnéticas de granulometría menor a la del resto de la vialidad.

Las muestras recolectadas en Circuito Bicentenario describen un perfil (fig.8.23b) en el que la mayoría de los valores se encuentran por debajo de $1 \times 10^{-3} [Am^2/kg]$. Las excepciones a lo anterior están representadas por las muestras 342 y 404, cuyos valores de Magnetización Remanente Anhisterética se aproximan a $2 \times 10^{-3} [Am^2/kg]$. Dichas muestras fueron recolectadas a unos metros de las intersecciones entre Circuito Bicentenario-Fray Servando Teresa de Mier y Circuito Bicentenario-Profesora Eulalia Guzmán, ambos cruces con alta afluencia vehicular.

Por otro lado, los perfiles de Magnetización Remanente Isotermal muestran que para Calzada de Tlalpan (fig.8.19c), los valores más representativos se encuentran en las muestras, 77, 226 y 279, las cuales también se presentan con cifras importantes en la Susceptibilidad Magnética Específica de la vialidad. Dichas muestras se ubican a unos metros de los cruces de Calzada de Tlalpan-Anillo Periférico, Calzada de Tlalpan-General Emiliano Zapata y Calzada de Tlalpan-Primero de Mayo (respectivamente) lo cual sugiere que el material particulado de cruces con gran afluencia vehicular presentarán mayores valores de MRI que en el resto de la vialidad.

En Avenida Insurgentes (fig.8.20c), los valores más significativos de MRI se encuentran en las muestras 142, 169, 371 y 438, siendo esta última la que posee el máximo valor de la vialidad con $65 \times 10^{-3} [Am^2/kg]$ y se encuentra ubicada en el cruce entre Avenida Insurgentes y Avenida Fortuna. Dicha muestra también representa el máximo para la Susceptibilidad Magnética Específica de la vialidad. Así mismo, es importante señalar que la muestra 371,

también resulta relevante para el Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia; pues su valor sugiere una concentración media de minerales ferrimagnéticos. En lo que respecta a las muestras 142 y 149, recolectadas en los alrededores del cruce entre Avenida Insurgetes y Avenida Copilco, se presume que al tratarse de un cruce de gran tránsito vehicular los valores de MRI son más elevados que en las muestras aledañas.

En el perfil correspondiente al Corredor Cero Emisiones de Eje Central (fig.8.21c) los mayores valores se encuentran en las muestras 225 y 406; esta última posee el valor más elevado de MRI de la vialidad y correlaciona con el máximo de Susceptibilidad Magnética Específica de la misma. Dichas muestras fueron recolectadas a unos metros de los cruces Eje Central-General Emiliano Zapata (muestra 225) y Eje Central-Calzada Vallejo (muestra 406), lo cual sugiere nuevamente que en cruces viales altamente transitados los valores de MRI serán mayores a los del resto de la vialidad.

En el caso del Eje 2 Oriente (fig.8.22c) se observan los valores más elevados de MRI en las muestras 281 y 325, siendo esta última la que tiene el valor máximo de toda la vialidad con aproximadamente $85 \times 10^{-3} [Am^2/kg]$. Dicha muestra fue recolectada a unos metros de la intersección entre Eje 2 Oriente y Viaducto Río de la Piedad, zona de gran afluencia vehicular.

Finalmente, para Circuito Bicentenario (fig.8.23c) el máximo valor se encuentra en la muestra 343 ubicada en los alrededores del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, específicamente en el cruce entre Circuito Bicentenario y el Eje 1 Norte. Este máximo, también corresponde al mayor valor de Susceptibilidad Magnética Específica de la vialidad. Lo anterior sugiere nuevamente que en zonas de gran afluencia vehicular, y donde convergen distintos tipos de transporte, los valores de MRI serán mayores a los del resto de la vialidad.

El valor máximo de Magnetización Remanente Isotermal de todas las vialidades se encontró en la muestra 325 correspondiente a Eje 2 Oriente (Tabla 8.3).

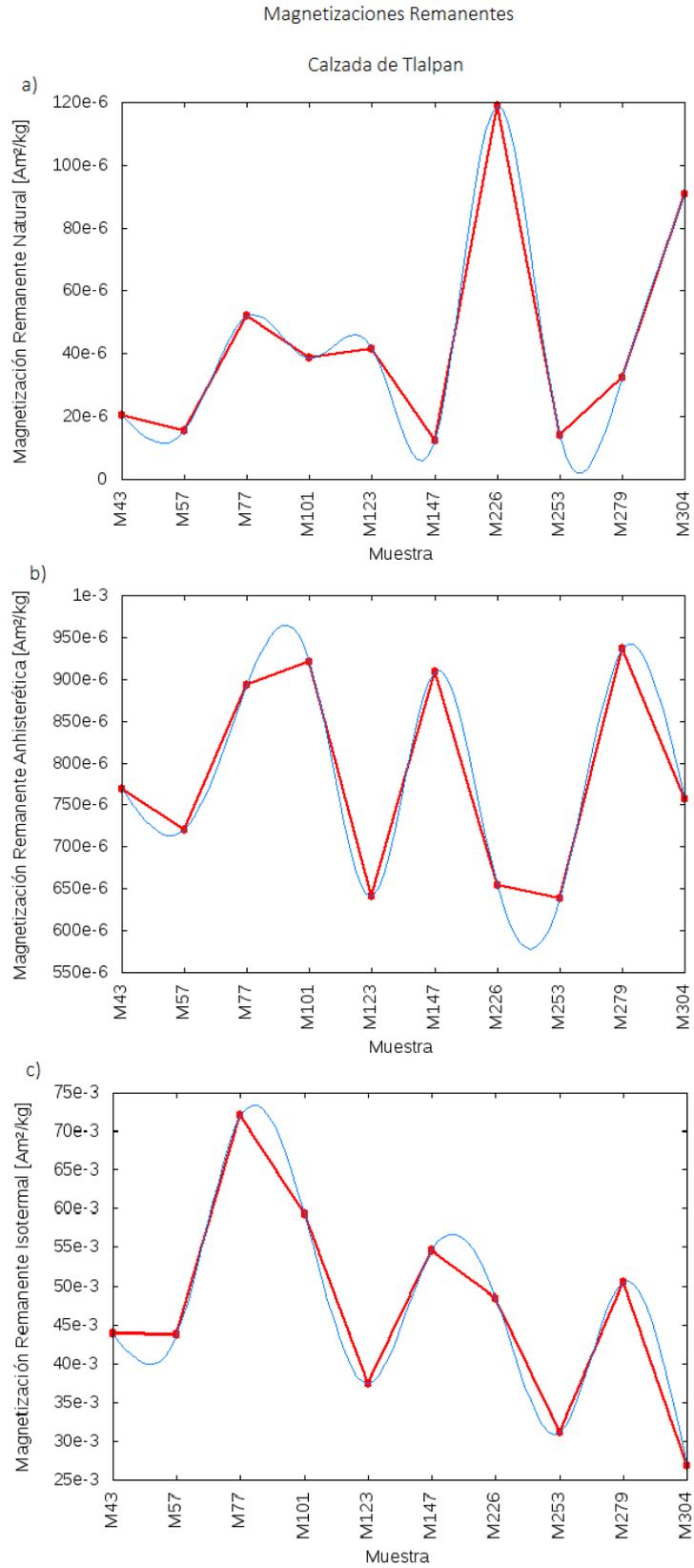


Figura 8.19: Perfil de Magnetizaciones Remanentes a lo largo de Calzada de Tlalpan. a) Magnetización Remanente Natural, b) Magnetización Remanente Anhisterética, c) Magnetización Remanente Isotermal.

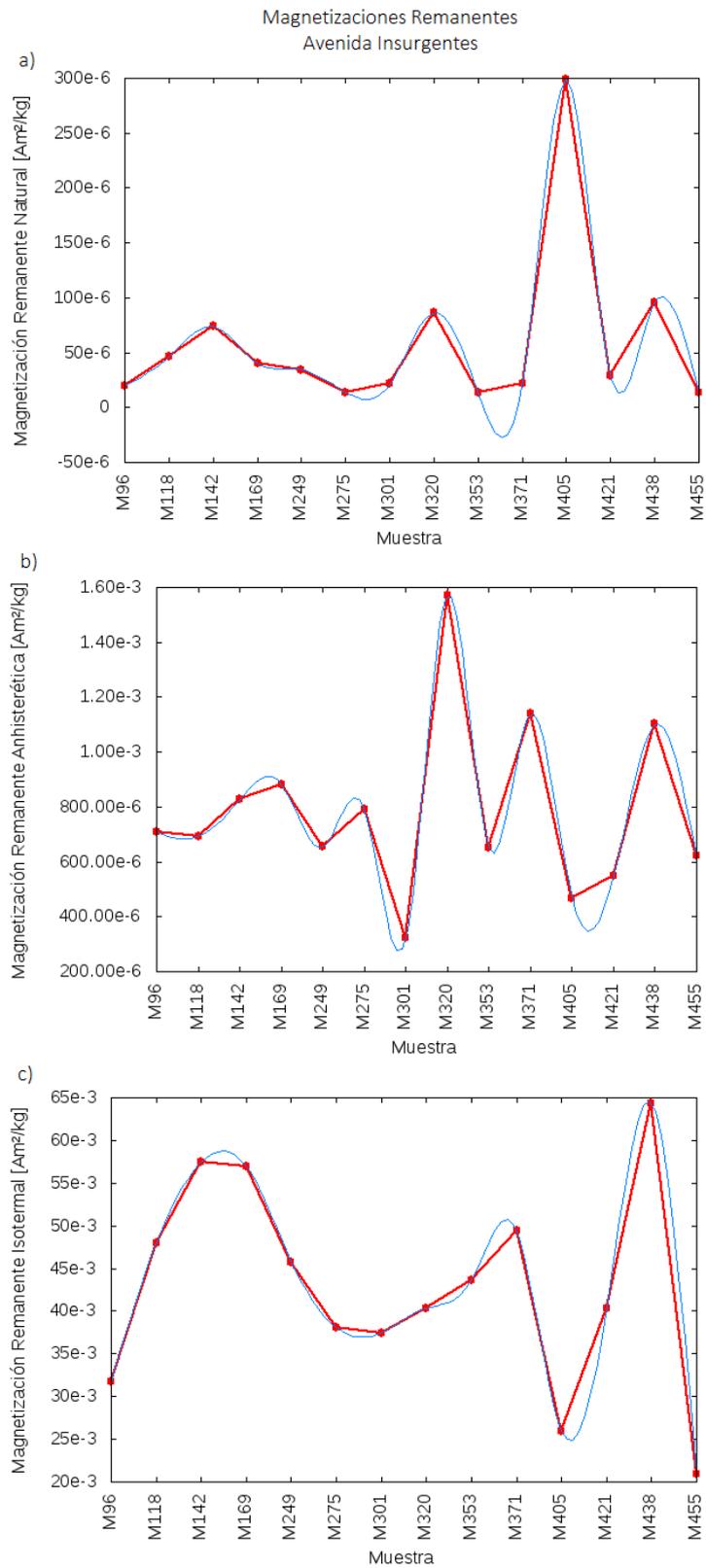


Figura 8.20: Perfil de Magnetizaciones Remanentes a lo largo de Avenida Insurgentes. a) Magnetización Remanente Natural, b) Magnetización Remanente Anihisterética, c) Magnetización Remanente Isotermal.

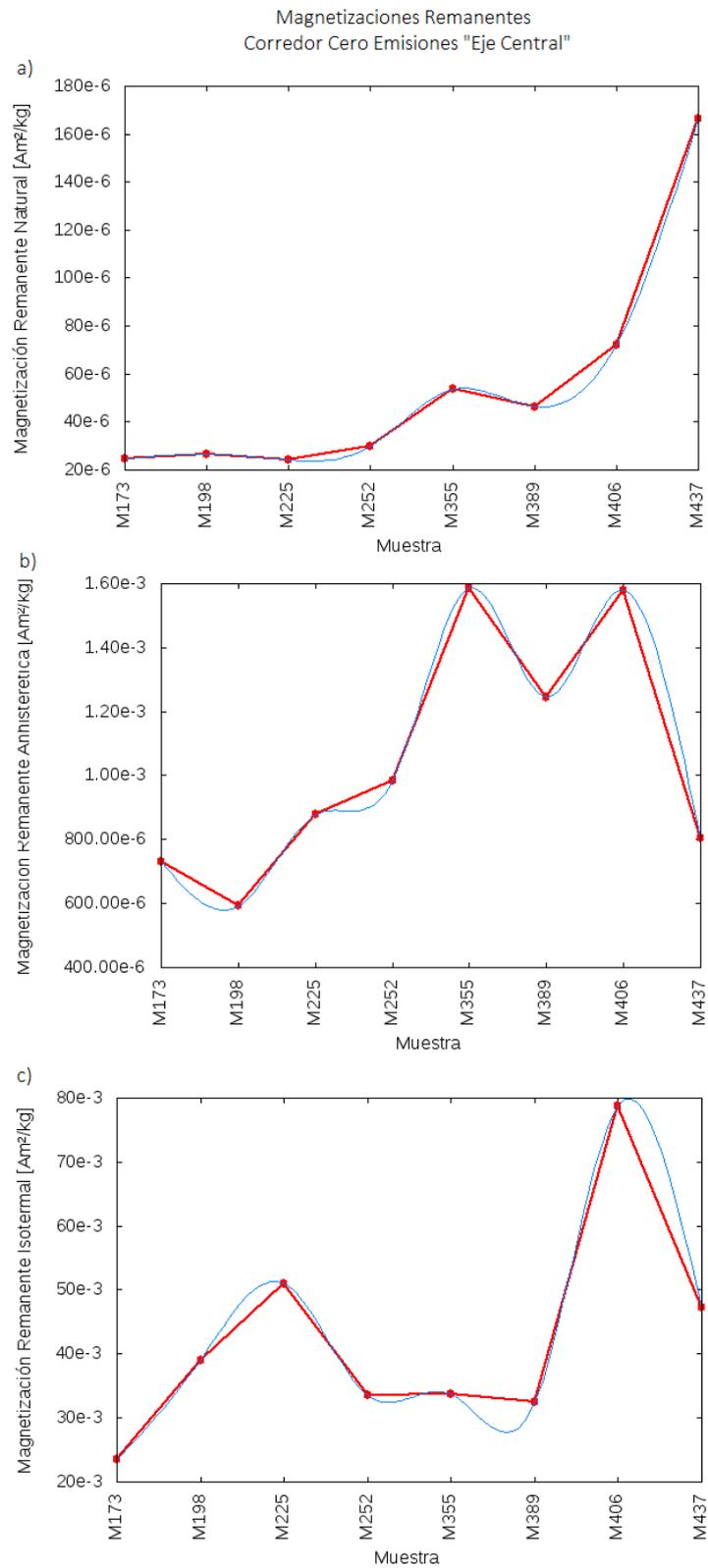


Figura 8.21: Perfil de Magnetizaciones Remanentes a lo largo de Corredor Cero Emisiones. a) Magnetización Remanente Natural, b) Magnetización Remanente Anisotrópica, c) Magnetización Remanente Isotérmica.

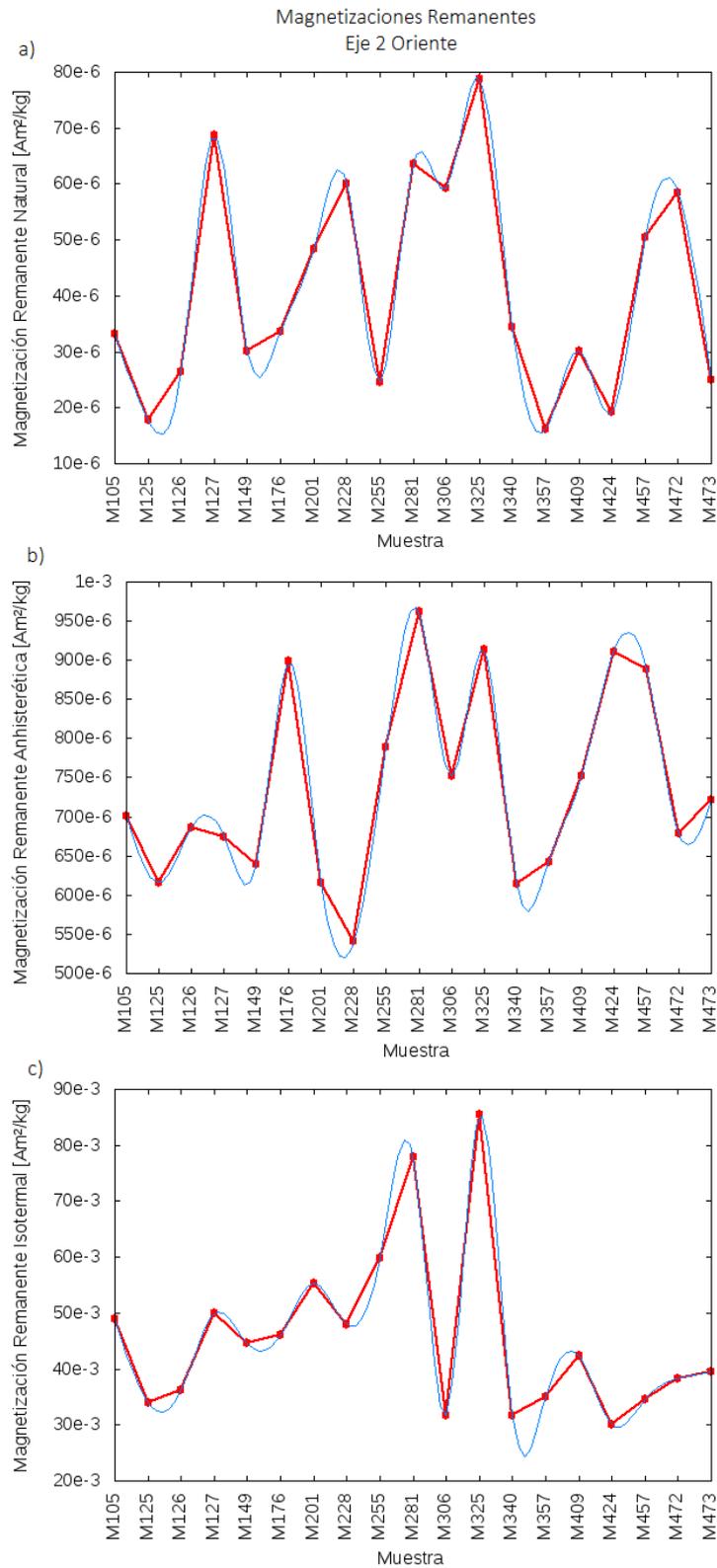


Figura 8.22: Perfil de Magnetizaciones Remanentes a lo largo de Eje 2 Oriente. a) Magnetización Remanente Natural, b) Magnetización Remanente Anihisterética, c) Magnetización Remanente Isotermal.

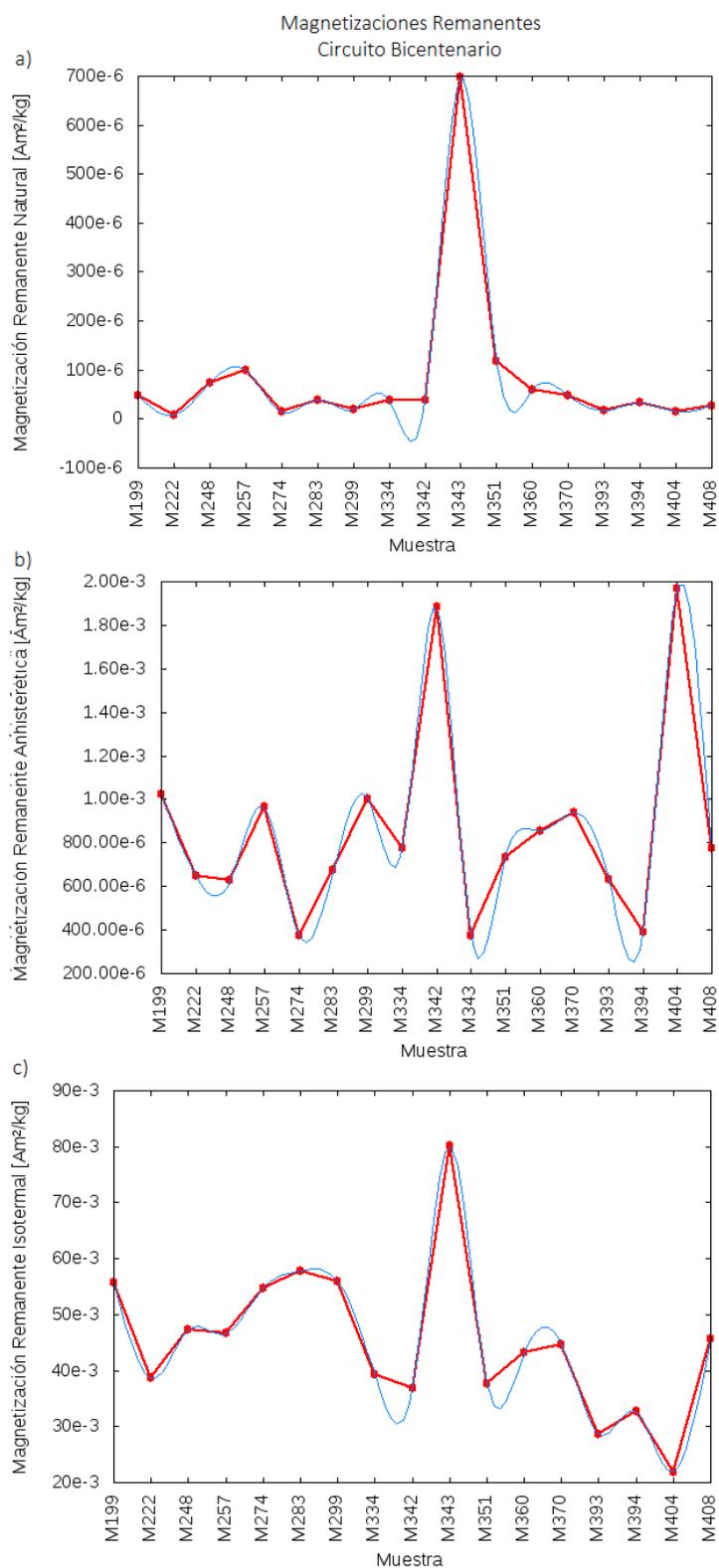


Figura 8.23: Perfil de Magnetizaciones Remanentes a lo largo de Circuito Bicentenario. a) Magnetización Remanente Natural, b) Magnetización Remanente Aniheterética, c) Magnetización Remanente Isotermal.

Magnetizaciones remanentes			
Segmento	$MRN [Am^2/kg]$	$MRI_{1000} [Am^2/kg]$	$MRA_{120} [Am^2/kg]$
Máx.	6.96771E-04	8.546906E-02	1.967909E-03
Mín.	7.9945E-06	2.0926644E-02	3.21236E-04
Prom.	5.67906E-05	4.4954546E-02	8.21276E-04

Tabla 8.3: Valor máximo, mínimo y promedio de MRN, MRI y MRA.

8.5. Curvas de adquisición de MRI y MRA

Para poder observar el comportamiento detallado de algunas muestras al adquirir Magnetización Remanente Isotermal y Anhisterética, se construyeron las siguientes curvas de adquisición de MRI y MRA:

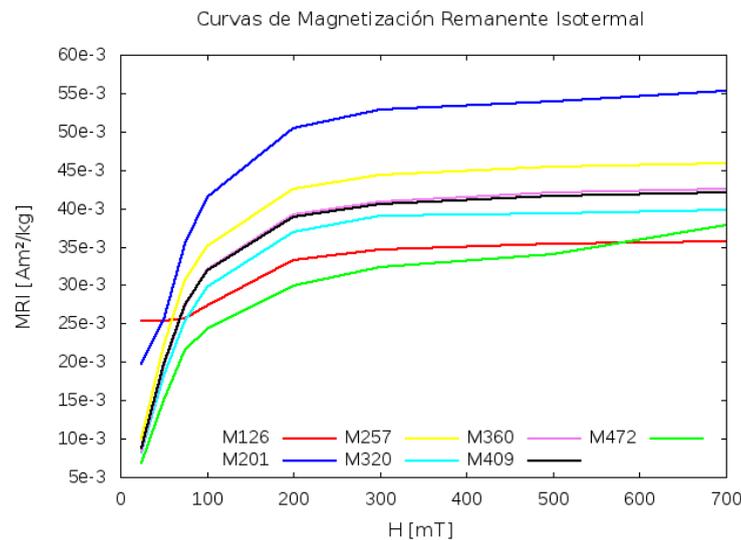


Figura 8.24: Curvas de Magnetización Remanente Isotermal obtenidas de siete muestras seleccionadas.

Todas las curvas de MRI de las muestras seleccionadas (fig. 8.24) muestran un crecimiento rápido al aplicarse campos menores a 100 [mT]. Para campos entre 100 [mT] y 200 [mT], el crecimiento se da de forma más lenta, para después comenzar a ser casi constante en campos comprendidos entre 200 [mT] y 300 [mT], dando lugar a un comportamiento con

tendencia constante en campos de 300[mT] a 700 [mT], o simplemente superiores a los 300 [mT]. En este sentido, destaca la muestra 201 (ubicada en el cruce entre Eje 2 Oriente y Ermita Iztapalapa) pues presenta el crecimiento más rápido al aplicar las distintas intensidades de campo magnético. Este comportamiento señala la tendencia característica de muestras con concentraciones elevadas de minerales ferrimagnéticos como titanomagnetita y titanomaghemita, mismos que son producidos de, manera natural en rocas ígneas y por fuentes antrópicas (Cejudo *et al.*, 2015b).

Sin embargo, la muestra 472, correspondiente al Eje 2 Oriente, no presenta la misma tendencia horizontal después de aplicarle un campo de 300 [mT], pues sus valores aumentan gradualmente en campos entre 0.5 [T] y 0.7 [T]. Este comportamiento es característico de mezclas de minerales antiferrimagnéticos (como hematita o goethita), minerales secundarios antiferromagnéticos o paramagnéticos (generados por plásticos o materia orgánica), con materiales ferrimagnéticos (Cejudo *et al.*, 2015b).

De acuerdo con lo observado en las curvas de Magnetización Remanente Anhisterética (fig.8.25), es posible señalar que las muestras: 126, 257, 360, 320 y 409 describen un comportamiento similar en los valores de este parámetro; ya que mantienen magnitudes de magnetización semejantes al aplicarles campos iguales, y sus máximos se encuentran en un rango de 600×10^{-6} [Am²] a 700×10^{-6} [Am²]. Fuera de este rango se posicionan las muestras 201 y 472. La primera presenta los mayores valores de MRA (de todas las muestras seleccionadas) en los distintos campos aplicados, siendo aproximadamente 800×10^{-6} [Am²] el valor obtenido al aplicar un campo de corriente alterna de 100 [mT]. Por otro lado, la muestra 472 es la que obtiene los menores valores de MRA, mismos que incrementan muy poco al aumentar la magnitud de los campos aplicados. Lo anterior sugiere que la muestra 201 es la que presenta partículas magnéticas de menor granulometría pues adquiere Magnetización Remanente Anhisterética con mayor facilidad. Ambas muestras se recolectaron sobre Eje 2 Oriente, aproximadamente en los cruces con la Calzada Ermita Iztapalapa y Avenida Río de los Remedios, respectivamente.

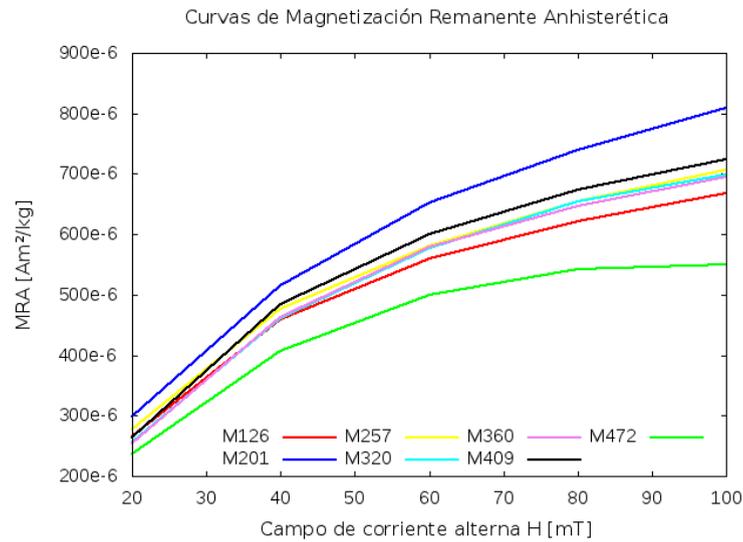


Figura 8.25: Curvas de Magnetización Remanente Anhisterética obtenidas de siete muestras seleccionadas.

8.6. Cociente S_{radio} (S_{-200})

El cociente S se calculó con el objetivo de determinar la proporción de minerales de baja coercitividad en una muestra (ferrimagnéticos). Si el valor de S_{200} en una muestra es mayor que 0.7, los minerales magnéticos predominantes son de baja coercitividad, si el valor es menor a 0.7 los minerales predominantes serán de alta coercitividad, es decir, antiferromagnéticos. En la tabla 8.5, se muestran los valores máximos, mínimos y promedio del cociente S.

Cociente S radio	
Segmento	S_{-200}
Máx.	0.997113887
Mín.	0.304256113
Prom.	0.740285457

Tabla 8.4: Valor máximo, mínimo y promedio del cocientes S radio.

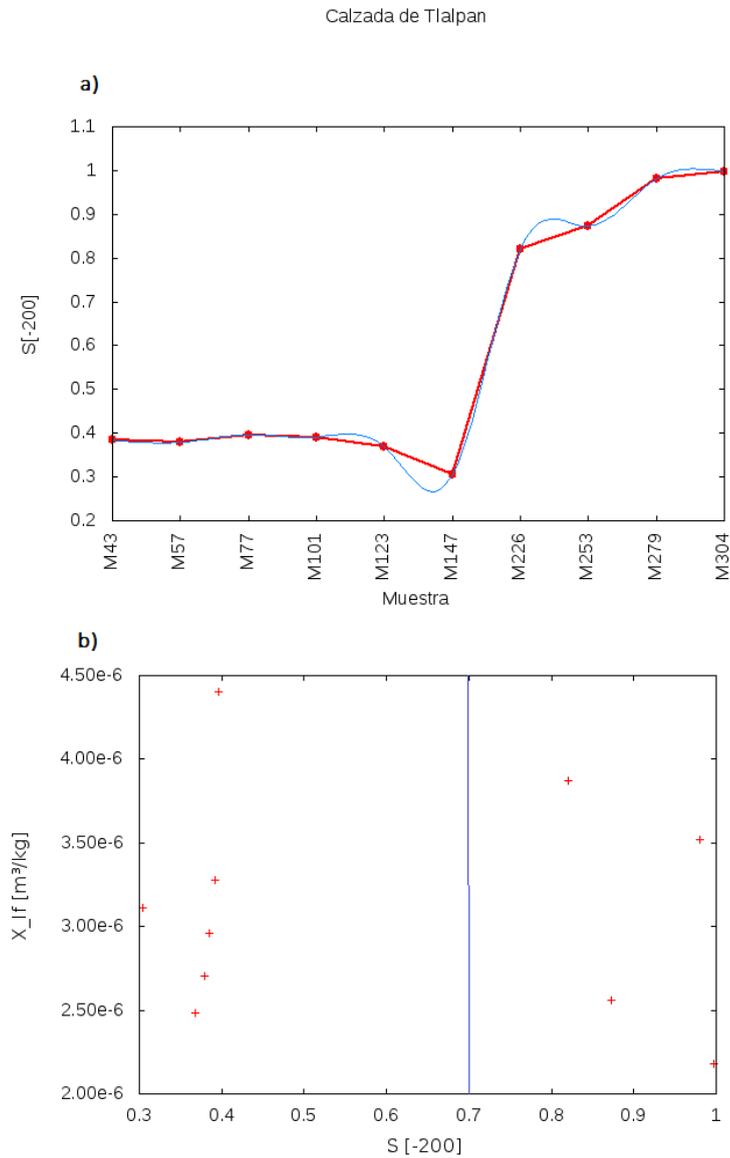


Figura 8.26: a)Perfil del cociente S_{-200} a lo largo de Calzada de Tlalpan. b)Gráfica del cociente S_{-200} vs χ_{lf} a lo largo de Calzada de Tlalpan. La línea azul señala el límite entre minerales con valores altos y bajos de S_{-200} .

La figura 8.26a presenta a las muestras posicionadas en la zona sur de la vialidad con valores de cociente S_{radio} menores a 0.7, indicando la presencia de minerales de coercitividad alta, es decir antiferromagnéticos, mientras que las muestras recolectadas en el segmento norte de la vialidad modifican abruptamente esta característica, pues poseen valores muy cercanos a 1, indicando mayor presencia de minerales ferrimagnéticos. Al generar una gráfica

como la mostrada en la figura 8.26b también se puede observar que la mayoría de las muestras de esta vialidad presentan una fase antiferrimagnética, lo cual confirma la aseveración descrita.

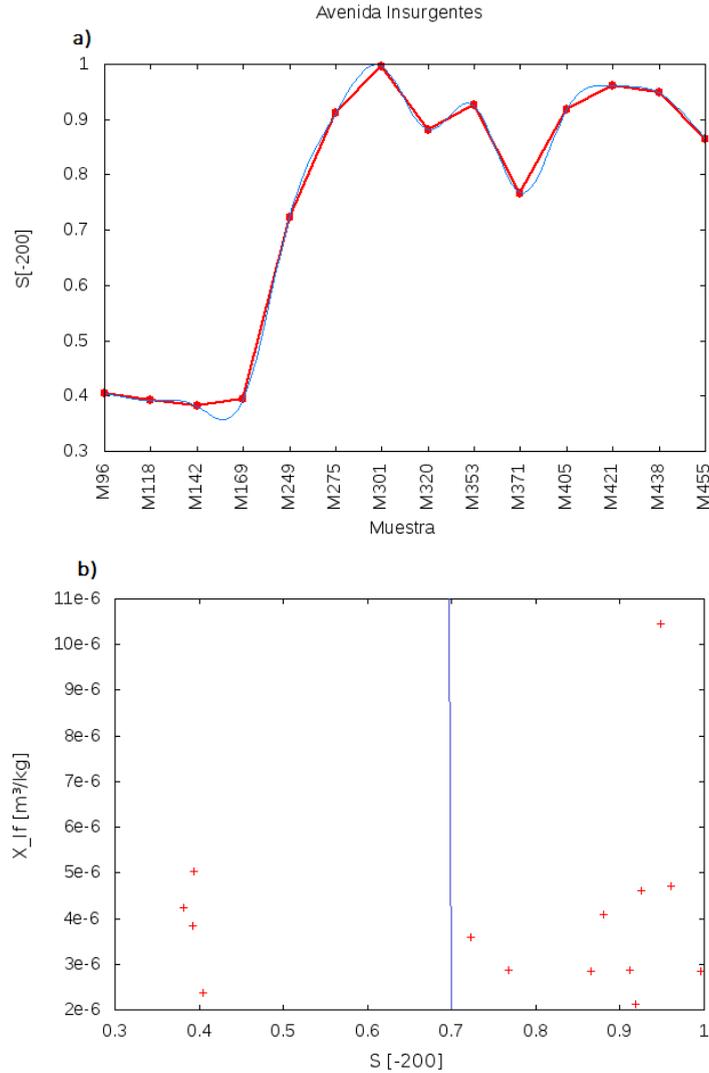


Figura 8.27: a)Perfil del cociente S_{-200} a lo largo de Avenida Insurgentes. b)Gráfica del cociente S_{-200} vs χ_{lf} a lo largo de Avenida Insurgentes. La línea azul señala el límite entre minerales con valores altos y bajos de S_{-200} .

Por otro lado, la mayoría de muestras recolectadas en Avenida Insurgentes (Figura 8.27a) presentan valores entre 0.7 y 1 lo cual señala una mayor contribución de minerales ferrimagnéticos a lo largo de la vialidad. Lo anterior, también puede observarse en la figura 8.27b, en donde la mayoría de las muestras se presentan con una fase ferrimagnética.

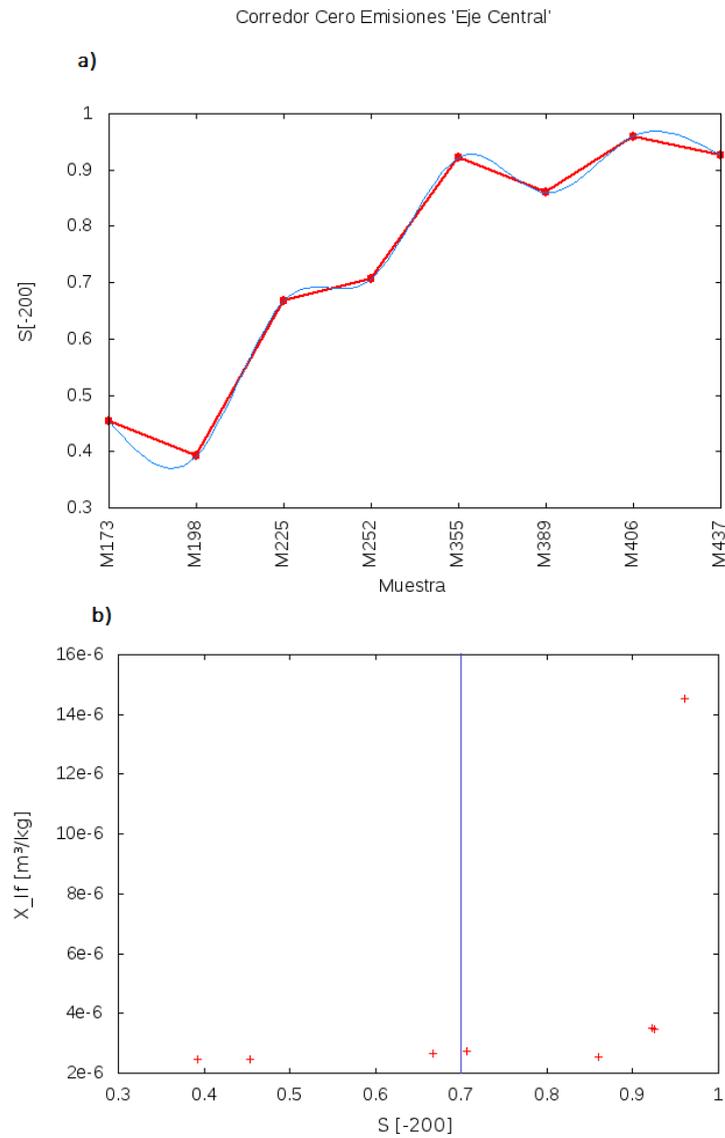


Figura 8.28: a) Perfil del cociente S_{-200} a lo largo del Corredor Cero Emisiones. b) Gráfica del cociente S_{-200} vs χ_{lf} a lo largo del Corredor Cero Emisiones. La línea azul señala el límite entre minerales con valores altos y bajos de S_{-200} .

En el caso del perfil correspondiente al Corredor Cero emisiones de Eje Central (figura 8.28a) se puede observar una tendencia de crecimiento del cociente hacia la zona norte de la vialidad, siendo las últimas cuatro muestras recolectadas en la misma, las que poseen valores de cociente más cercanos a 1. Esto se comprueba al representar los datos como se muestra en la figura 8.28b, en la cual se señala que la mayoría de las muestras de polvo urbano

recolectadas en la vialidad presentan una fase ferrimagnética.

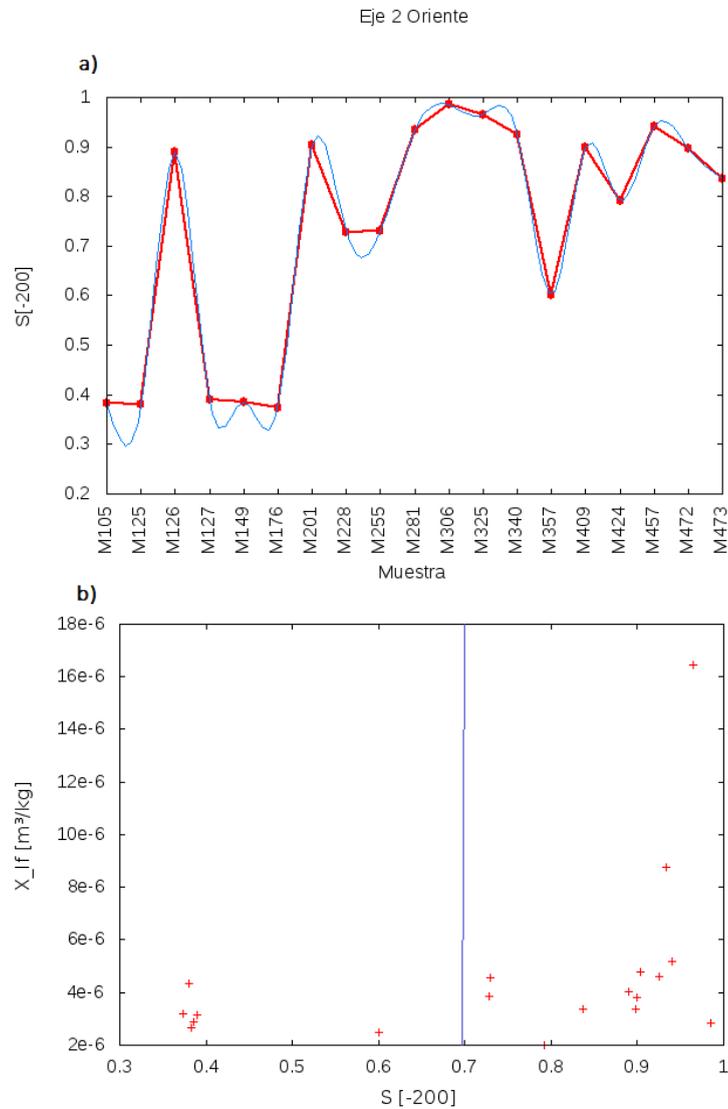


Figura 8.29: a) Perfil del cociente S_{-200} a lo largo del Eje 2 Oriente. b) Gráfica del cociente S_{-200} vs χ_{lf} a lo largo del Eje 2 Oriente. La línea azul señala el límite entre minerales con valores altos y bajos de S_{-200} .

Para el caso del Eje 2 Oriente (figura 8.29a) la mayoría de las muestras presentan valores de cociente S_{-200} mayores a 0.7, lo cual indica que a lo largo de la vialidad se presenta una importante influencia de minerales ferrimagnéticos en los polvos urbanos. Representando los datos como se muestra en la figura 8.29b, se confirma este hecho, pues muestra que la mayoría de las muestras de polvo urbano presentan una fase ferrimagnética.

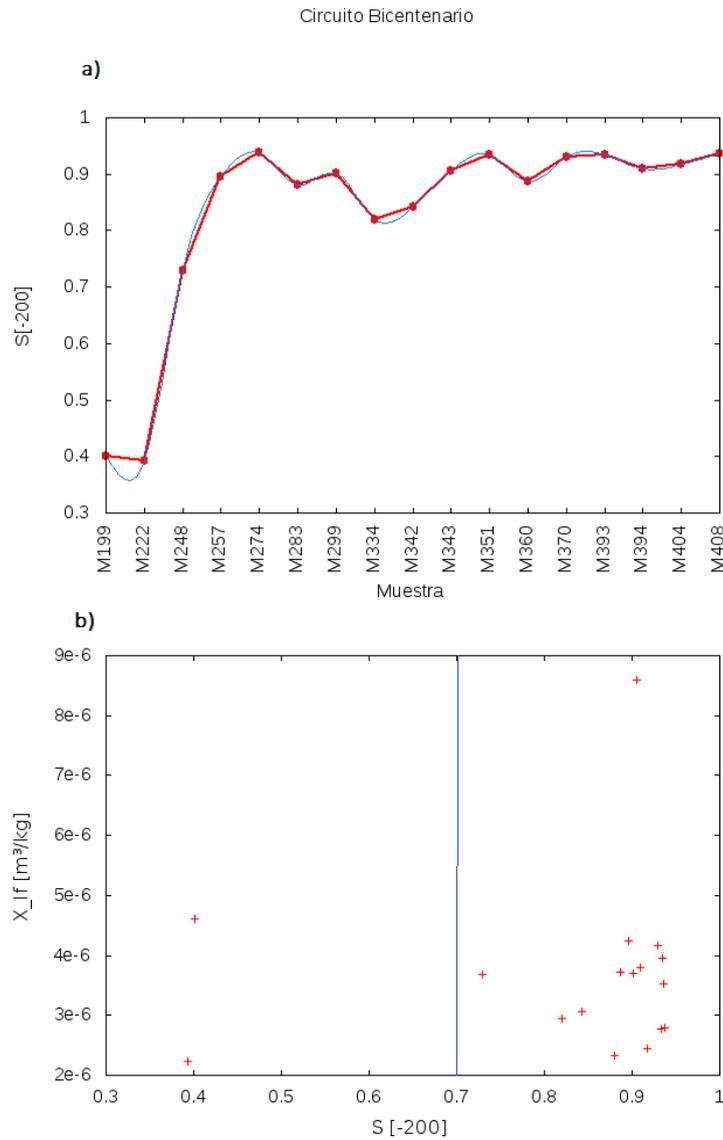


Figura 8.30: a) Perfil del cociente S_{-200} a lo largo del Circuito Bicentenario. b) Gráfica del cociente S_{-200} vs χ_{lf} a lo largo del Circuito Bicentenario. La línea azul señala el límite entre minerales con valores altos y bajos de S_{-200} .

Finalmente, en el perfil correspondiente a Circuito Bicentenario (figura 8.30a), se puede observar que solamente las dos primeras muestras recolectadas (correspondientes a la zona sur de la vialidad) poseen valores menores 0.7, el resto de ellas presentan valores muy cercanos a 1. Esto puede observarse también al presentar los datos como en la figura 8.30b, en donde se observa que la mayoría de las muestras presentan una fase ferrimagnética, lo cual permite apreciar el dominio de minerales ferrimagnéticos en el material particulado de la vialidad.

De esta manera, el mapa presentado en la figura 8.31 muestra la distribución de valores de S_{-200} mayores a 0.7, pudiéndose observar que la zonas centro y norte de la Ciudad de México, son las que presentan la mayor concentración de minerales ferrimagnéticos, independientemente de las vialidades en las que se posicionen.

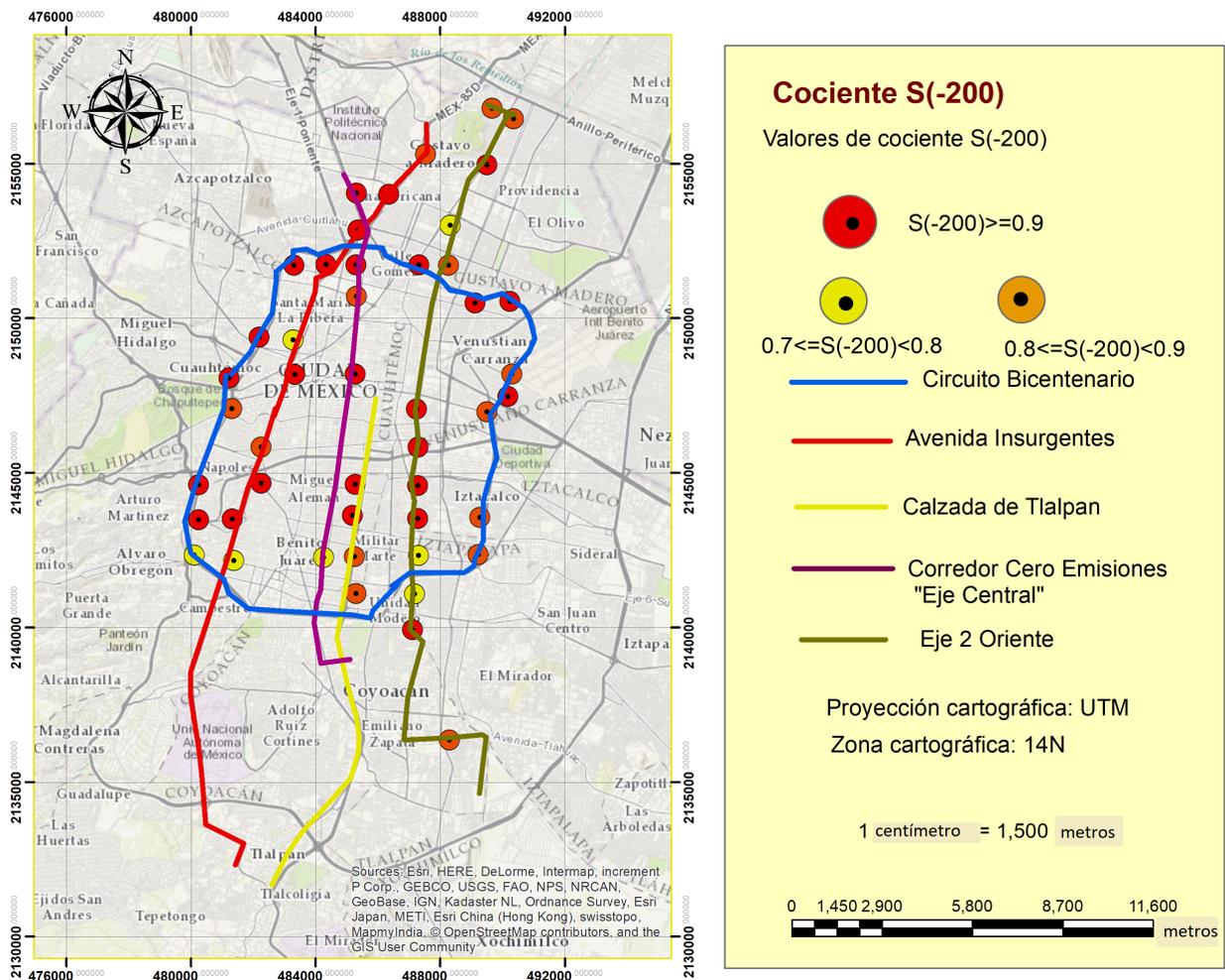


Figura 8.31: Mapa de valores del cociente S_{-200} .

8.7. Cociente MRA/MRIS

El cociente MRA/MRIS es utilizado como indicador de la granulometría presente en el material, siendo las partículas pequeñas las que presentan valores mayores en dicha razón, es decir, más cercanos a la unidad (Evans y Heller, 2003). En la tabla 8.5 se muestra el valor máximo, mínimo y promedio de este cociente.

Cociente MRA/MRIS	
Segmento <i>MRA/MRIS</i>	
Máx.	0.090015418
Mín.	0.004653944
Prom.	0.020121097

Tabla 8.5: Valor máximo, mínimo y promedio de los cocientes S radio y MRA/MRIS.

Para el caso de Calzada de Tlalpan (Figura 8.32) las partículas más pequeñas e la vialidad y de un solo dominio (con valores en cociente cercanos a 0.03), se presentan en la zona norte de la misma, mientras que las partículas más gruesas corresponden a las muestras 77 y 225.

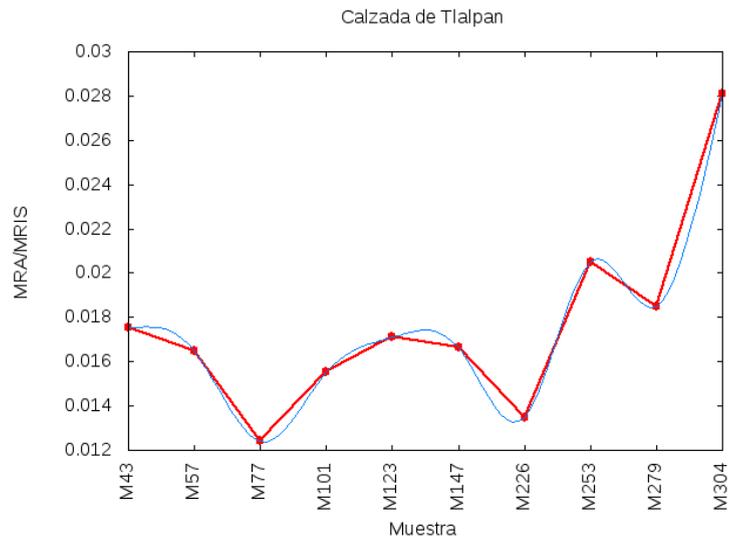


Figura 8.32: Perfil del cociente MRA/MRIS a lo largo de Calzada de Tlalpan.

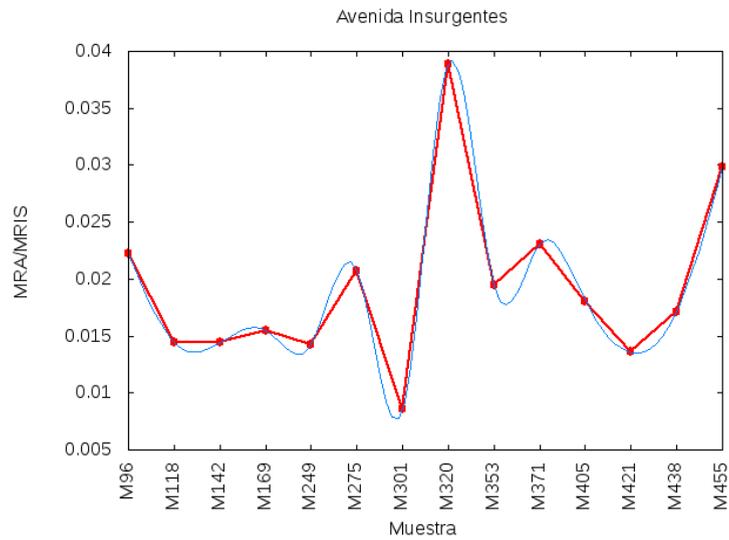


Figura 8.33: Perfil del cociente MRA/MRIS a lo largo de Avenida Insurgentes.

Para el caso de la Avenida Insurgentes (Figura 8.33) la muestra que presenta el valor máximo (0.04) y por consiguiente, las partículas más pequeñas, corresponde a la número 320, mientras que para la mayoría de la avenida las muestras se ubican en valores bajos correspondientes a granos gruesos con mayor probabilidad de poseer más de un dominio.

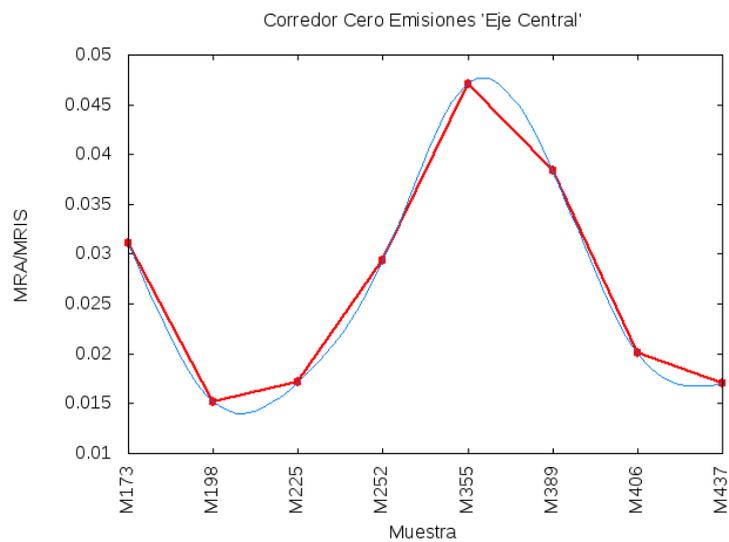


Figura 8.34: Perfil del cociente MRA/MRIS a lo largo del Corredor Cero Emisiones.

En el Corredor Cero Emisiones de 'Eje Central' (fig. 8.34) las partículas más pequeñas, con valores mayores a 0.03 en el cociente, se encuentran en la zona centro-norte de la vialidad

mientras que la granulometría más gruesa se encuentra en las muestras 198 y 437 ubicadas a unos metros de los cruces Eje Central-Circuito Bicentenario y Eje Central-Avenida Insurgentes.

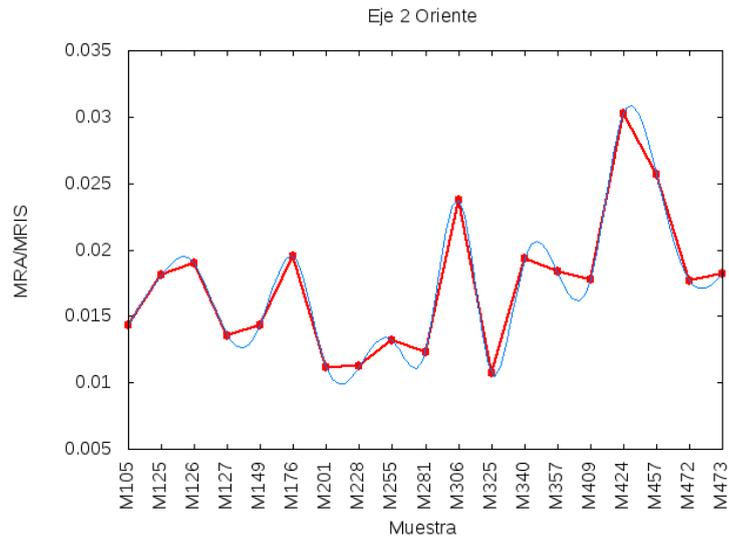


Figura 8.35: Perfil del cociente MRA/MRIS a lo largo del Eje 2 Oriente.

El Eje 2 Oriente es el que presenta mayores variaciones de granulometría a lo largo de su recorrido, presentando la muestra con partículas más pequeñas (valores en cociente por encima de 0.025) en el segmento norte y la granulometría más gruesa en la zona centro de la vialidad.

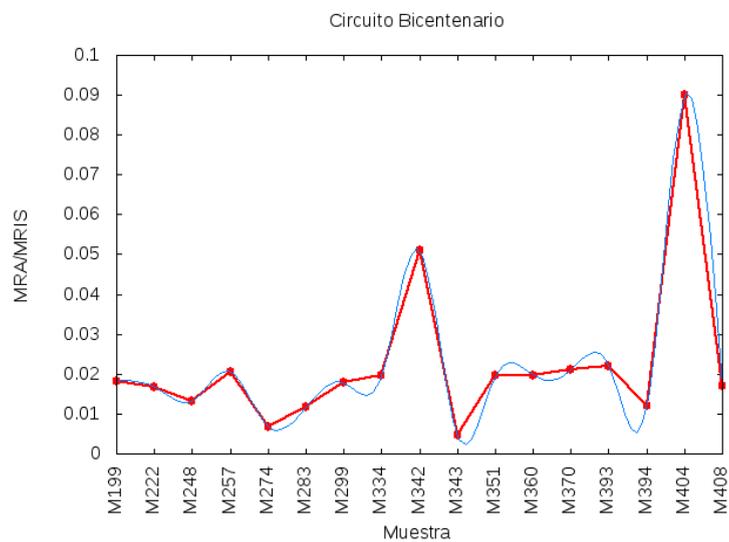


Figura 8.36: Perfil del cociente MRA/MRIS a lo largo del Circuito Bicentenario.

En lo que respecta a Circuito Bicentenario, la granulometría más pequeña (con un valor en el cociente muy cercano a 0.1) se presenta en la muestra 404, correspondiente al segmento norte de la vialidad, mientras que las partículas más gruesas se encuentran en la muestra 343 ubicada en la parte este del circuito.

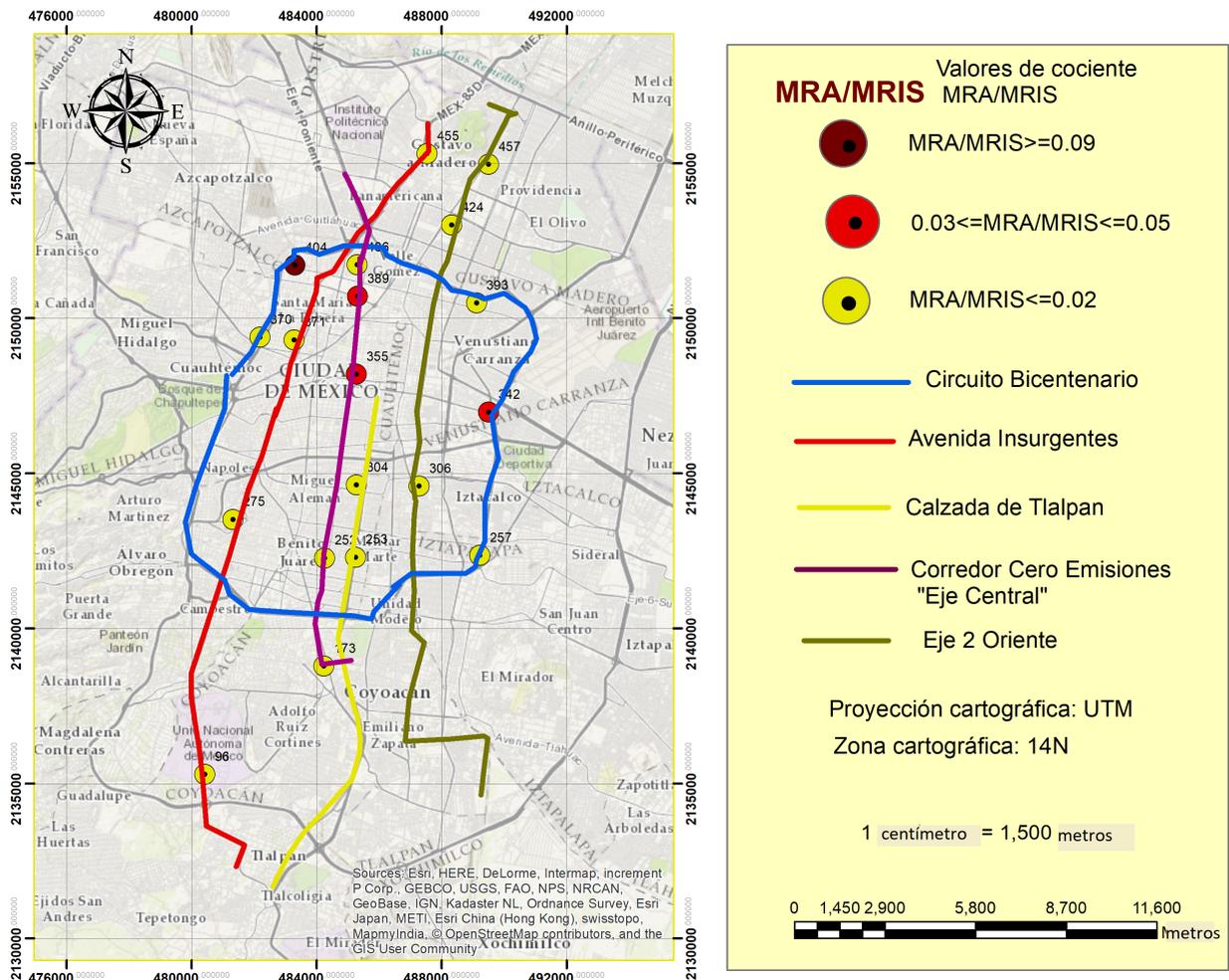


Figura 8.37: Mapa de valores del cociente *MRA/MRIS*.

Los valores obtenidos en este cociente señalan que el tamaño de las partículas de las muestras recolectadas en cada vialidad varía en distintas zonas de la misma. Sin embargo, todos los valores de este parámetro son muy cercanos a cero, por lo que la granulometría predominante en todas las vialidades es gruesa y con alta probabilidad de poseer más de un dominio magnético.

Finalmente, en el mapa mostrado en la figura 8.37 se observa la distribución de las muestras con valores más representativos del cociente, siendo las partículas de mayor granu-

lometría las que tienen mayor presencia a lo largo de las distintas vialidades.

8.8. Comparación entre parámetros magnéticos de los diferentes corredores de transporte

En los tres perfiles del promedio de porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia se observa que la vialidad con mayor concentración de minerales ferrimagnéticos superparamagnéticos ultrafinos es el Corredor Cero Emisiones de 'Eje Central', mismo que presenta en todos los perfiles una concentración media de los mismos. El resto de las vialidades también se observan con concentraciones medias, sin embargo, el Circuito Bicentenario es la vialidad que en promedio presenta las concentraciones más bajas de minerales ferrimagnéticos superparamagnéticos ultrafinos, con un valor de 0.45 % (fig. 8.38).

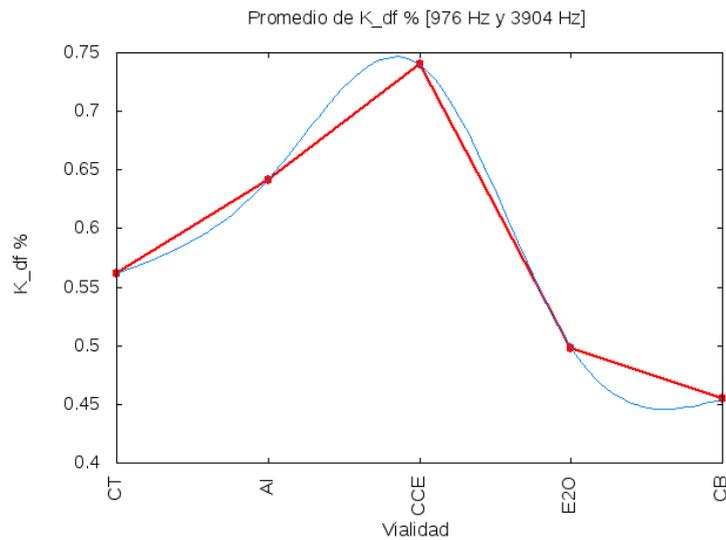


Figura 8.38: Comparación entre el promedio del porcentaje de susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia de cada vialidad.

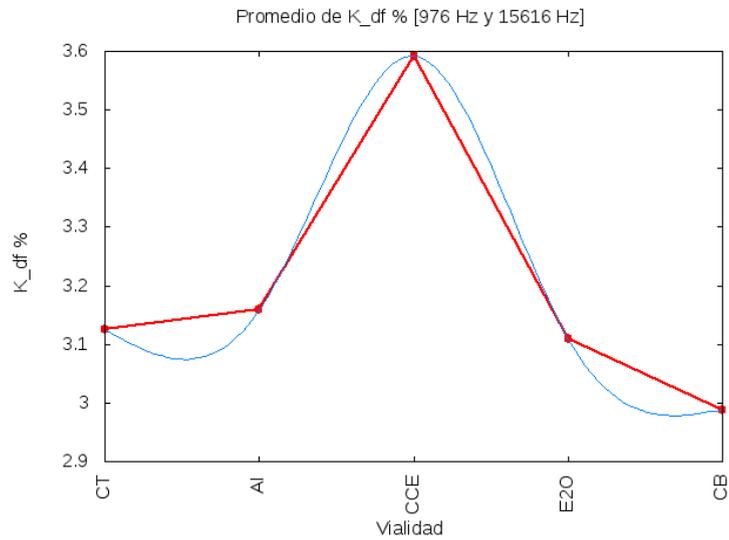


Figura 8.39: Comparación entre el promedio del porcentaje de susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia de cada vialidad.

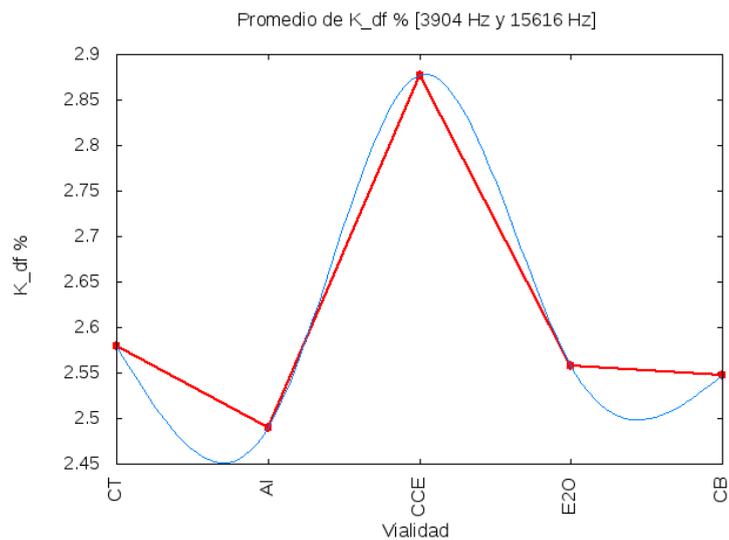


Figura 8.40: Comparación entre el promedio del porcentaje de susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia de cada vialidad.

Por otro lado, la vialidad cuyas partículas de polvo urbano poseen la mayor facilidad de ser magnetizadas (y por consiguiente tiene mayor presencia de minerales ferrimagnéticos) es Eje 2 Oriente como se muestra en la figura 8.41, mientras que Calzada de Tlalpan es la vialidad con el menor valor promedio de Susceptibilidad Magnética Específica.

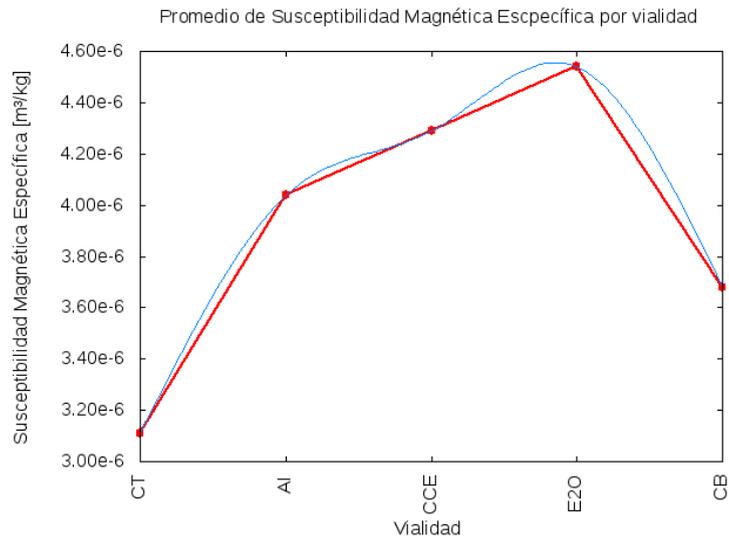


Figura 8.41: Comparación entre el promedio de la Susceptibilidad Magnética Específica.

En lo que respecta a la Magnetización Remanente Natural, el mayor valor promedio se encuentra en el Circuito Bicentenario, mientras que Eje 2 Oriente es la vialidad con menor intensidad de MRN (fig. 8.42). De la misma manera, el Corredor Cero Emisiones se muestra como la vialidad con el mayor valor promedio de Magnetización Remanente Anhisterética, sugiriendo que a lo largo de esta vialidad la granulometría de las partículas es menor. Así mismo, es posible señalar que Calzada de Tlalpan, Avenida Insurgentes y Eje 2 Oriente, mantienen valores similares en esta magnetización (fig. 8.43).

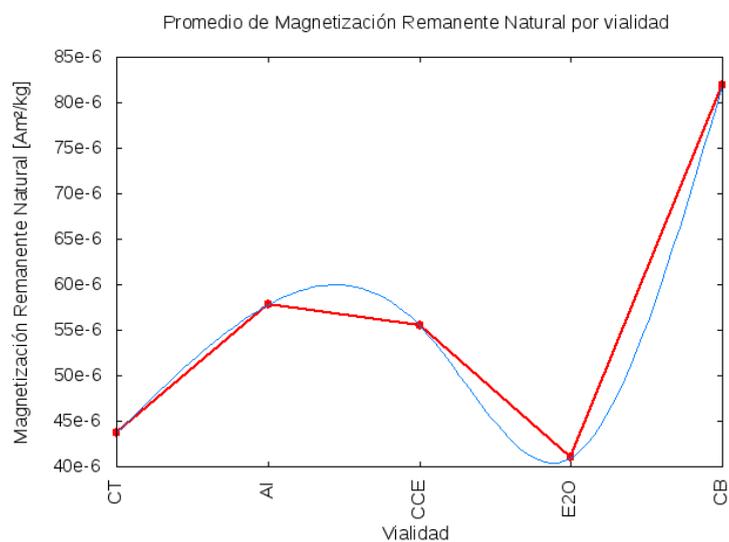


Figura 8.42: Comparación entre el promedio de la Magnetización Remanente Natural de cada vialidad.

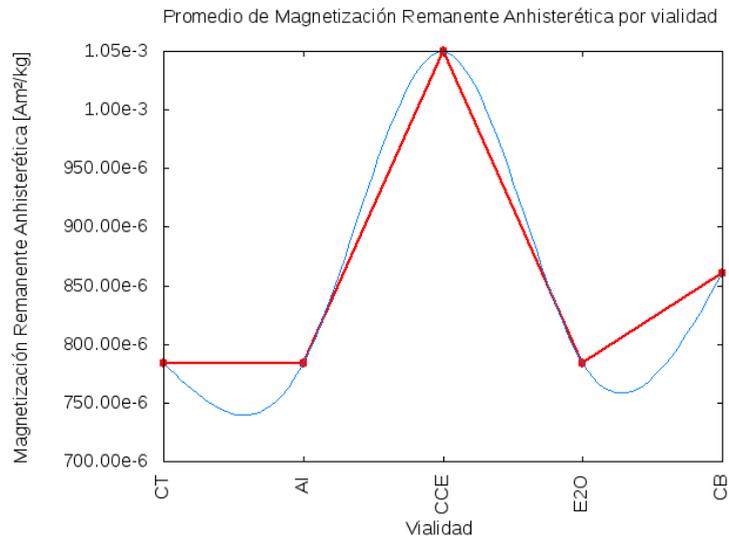


Figura 8.43: Comparación entre el promedio de la Magnetización Remanente Anhisterética de cada vialidad.

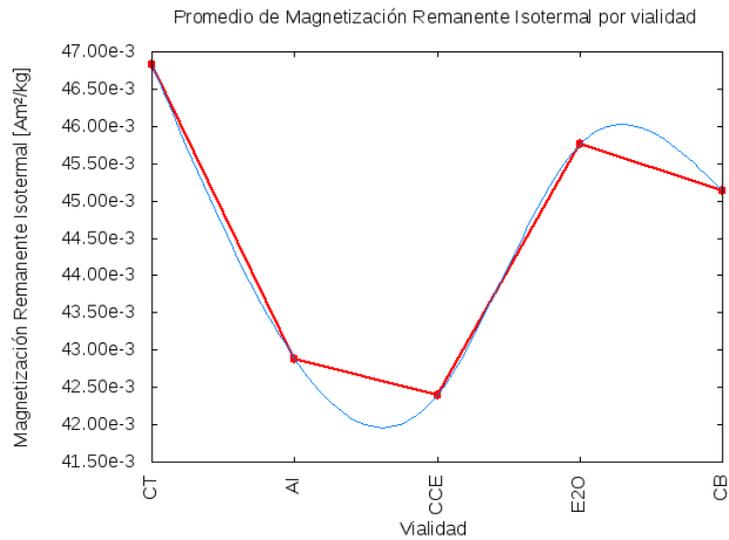


Figura 8.44: Comparación entre el promedio de la Magnetización Remanente Isotermal de cada vialidad.

El mayor valor promedio de MRI (fig. 8.44) lo posee Calzada de Tlalpan con una cifra indicada en perfil de aproximadamente $0.47[Am^2/kg]$, mientras que el menor de los mismos es atribuido al Corredor Cero Emisiones 'Eje Central'.

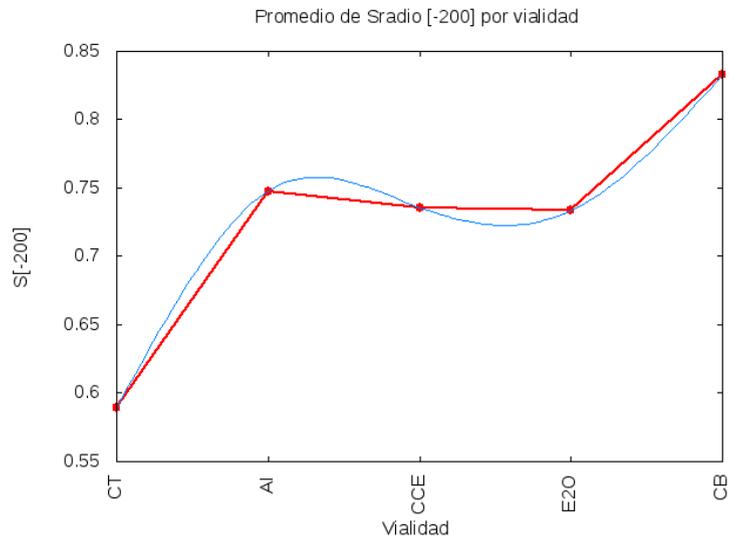


Figura 8.45: Comparación entre el promedio del cociente S_{-200} de cada vialidad.

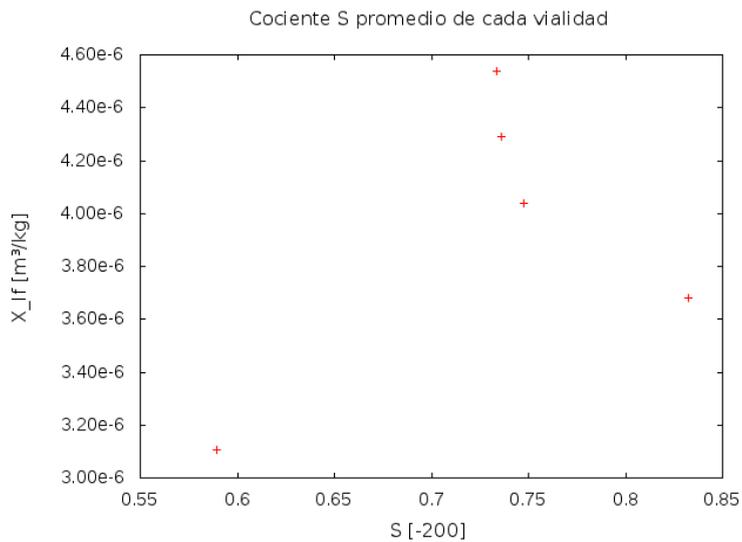


Figura 8.46: Comparación entre el promedio del cociente S_{-200} vs χ_{lf} de cada vialidad.

El perfil de valores promedio del cociente S_{-200} en cada vialidad señala que, a excepción de Calzada de Tlalpan, todas las vialidades poseen altas concentraciones de minerales ferrimagnéticos en sus polvos urbanos, siendo Circuito Bicentenario el que posee la mayor concentración de los mismos (fig. 8.45). Lo anterior puede observarse también en la figura 8.46, en donde se observa que cuatro de cinco vialidades señalan la presencia de fases ferrimagnéticas.

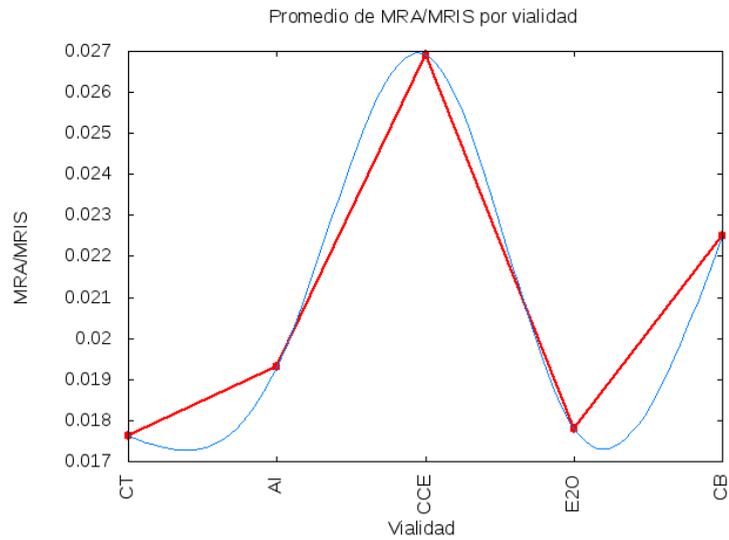


Figura 8.47: Comparación entre el promedio del cociente $MRA/MRIS$ de cada vialidad.

Finalmente, en el perfil que muestra un indicador de la granulometría promedio de cada vialidad se observa que los granos más pequeños son los presentes en las muestras del Corredor Cero Emisiones de Eje Central, mientras que tanto Calzada de Tlalpan como el Eje 2 Oriente presentan las partículas más gruesas. Nuevamente se debe señalar que pese a que hay vialidades cuya granulometría es mayor a la de otras, todos los corredores de transporte estudiados presentan granulometría gruesa debido a que poseen valores muy cercanos a cero en el cociente $MRA/MRIS$.

Con el fin de resumir la información antes descrita se presenta la tabla de la figura 8.48 en la que se muestran las vialidades con mayor y menor concentración de minerales ferrimagnéticos, así como el tipo de transporte que circula por ellas.

Parámetro	Mayor concentración de minerales ferrimagnéticos	Menor concentración de minerales ferrimagnéticos
Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia	Corredor Cero Emisiones 'Eje Central: Trolebús	Circuito Bicentenario: Autobús (diesel/gas natural)
Susceptibilidad Magnética Específica	Eje 2 Oriente: RTP	Calzada de Tlalpan: Microbús
Cociente S	Circuito Bicentenario: Autobús (diesel/gas natural)	Calzada de Tlalpan: Microbús
Cociente MRA/MRIS	Eje 2 Oriente: RTP Calzada de Tlalpan: Microbús	Corredor Cero Emisiones 'Eje Central: Trolebús

Figura 8.48: Vialidades con mayor y menor concentración de minerales ferrimagnéticos y su tipo de transporte

Capítulo 9

Conclusiones

A partir de los valores de los parámetros magnéticos trabajados en el presente proyecto de tesis, se puede señalar lo siguiente:

- Las curvas termomagnéticas y sus respectivas curvas generadas a partir de la segunda derivada de Tauxe sugieren que en el Eje 2 Oriente, Circuito Bicentenario y Calzada de Tlalpan los principales portadores magnéticos podrían hacer referencia a minerales como magnetita y titanohematita. En el caso de Avenida Insurgentes se observa una clara influencia de goethita en las muestras recolectadas en la vialidad, mismas que presentan también la presencia de magnetita. Finalmente, la muestra 198 recolectada sobre el Corredor Cero Emisiones de Eje Central sugiere nuevamente la existencia de magnetita como principal portador magnético.
- El Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia (figs.8.13, 8.12 y 8.11) señala al Corredor Cero Emisiones de Eje Central como una de las vialidades con mayores concentraciones de minerales ferrimagnéticos, como la titanomagnetita y titanomaghemita. Esto a pesar de que por esta vialidad circula un transporte de locomoción eléctrica 'trolebús'.
- Las gráficas obtenidas a partir del Cociente S_{-200} y la χ_{lf} , señalan que todas las vialidades estudiadas, excepto Calzada de Tlalpan, presentan fases ferrimagnéticas en sus muestras.
- De acuerdo con el Cociente S_{-200} la vialidad con la mayor concentración de minerales

ferrimagnéticos, es el Circuito Bicentenario. Por esta vialidad circula un transporte que funciona mediante diesel y gas natural, y que suele generar gran cantidad de partículas finas menores a $1 \mu m$.

- De acuerdo con la Susceptibilidad Magnética Específica y el cociente S_{-200} la Avenida Insurgentes posee una alta concentración de minerales ferrimagnéticos, siendo esta mayor a la del Corredor Cero Emisiones pero menor que la de Circuito Bicentenario, tomando en cuenta los valores del cociente S radio. Lo anterior, pese a que por ella circula el Metrobús, medio de transporte bajo en emisiones.
- Tanto el cociente S_{-200} como la Susceptibilidad Magnética Específica señalan al Eje 2 Oriente como una vialidad con alta concentración de minerales ferrimagnéticos, mientras que el Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia lo sitúa entre las vialidades de más baja concentración.
- Calzada de Tlalpan se presenta como una vialidad cuyos parámetros magnéticos coinciden con una baja concentración de minerales ferrimagnéticos. Esta característica permitiría pensar que el cambio de la flotilla de camiones que circula por dicha vialidad pudo haber propiciado bajas concentraciones de partículas contaminantes, sin embargo es necesario aplicar estudios dinámicos para poder tener certeza de dicha suposición.

Al analizar los perfiles de cada vialidad se pudo observar que las muestras recolectadas sobre cruces de gran afluencia vehicular, es decir, cruces entre avenidas principales presentan los mayores valores en la mayoría de los parámetros estudiados. Lo anterior, sugiere que el material particulado de las intersecciones viales entre una vía primaria y avenidas principales presenta mayores concentraciones de minerales ferrimagnéticos que el polvo urbano del resto de la vialidad.

En el sentido de los enunciados anteriores, se debe señalar, que pese a las estrategias de movilidad planteadas entorno a los medios de transporte capitalino, las emisiones de partículas contaminantes, específicamente, partículas ferrimagnéticas, no presentan bajas concentraciones. Esto es debido a que dichas estrategias van enfocadas a la mitigación de gases de efecto invernadero que no son considerados dentro de las partículas antes mencionadas.

Lo anterior, destaca la necesidad urgente de complementar las estrategias de mitigación enfocadas a Cambio Climático con medidas que permitan mantener bajas concentraciones de partículas ferrimagnéticas en polvos urbanos, pues estas representan un riesgo inminente para la salud de los habitantes de las grandes ciudades y deben ser YA prioridad en la agenda de Salud Pública del Gobierno Federal.

En la actualidad no existen estudios a nivel nacional que relacionen directamente concentraciones elevadas de gases de efecto invernadero en puntos específicos, con altas concentraciones de minerales ferrimagnéticos en polvos urbanos. Sobre esta línea, se sugiere correlacionar los resultados obtenidos mediante la metodología planteada con sistemas de monitoreo y registro de contaminantes atmosféricos, y complementarlos a su vez con análisis de contaminantes de vida corta como el carbono negro; esto con el fin de esclarecer la relación entre los dos tipos de emisiones.

Por otro lado, se plantea poder implementar estudios dinámicos a lo largo del año, con el fin de analizar si las condiciones meteorológicas de cada estación son un factor determinante en las concentraciones de minerales ferrimagnéticos en el polvo urbano depositado en las vialidades

De esta manera se concluye que la concentración de minerales ferrimagnéticos en polvos urbanos de distintos corredores de transporte si puede ser implementada como un indicador de la cantidad de partículas contaminantes relacionadas con partículas magnéticas. Así mismo, se ha señalado que el tipo de transporte que circula en las vialidades no representa necesariamente una medida para mantener concentraciones bajas en partículas contaminantes, específicamente partículas ferrimagnéticas y en consecuencia elementos potencialmente tóxicos.

Referencias

- AGICO. (2004). *Spinner magnetometer JR6/JR6A. User 's manual*. Advanced Geoscience Instruments Co.
- AGICO. (2009). *MFK1-FA / CS / CSL, MFK1-A / CS4 / CSL, MFK1-FB, MFK1-B*. Advanced Geoscience Instruments Co.
- AGICO. (2013). *LDA5/PAM1. Alternating Field Demagnetizer. Anhysteretic and Pulse Magnetizer. User 's manual*. Advanced Geoscience Instruments Co.
- ASC Scientific. (2013). *Operating Instructions. ASC Model IM-100 Impulse Magnetizer*. ASC Scientific.
- Bartington Instruments. (2010). *Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System*. Bartington Instruments.
- Bautista, F., Cejudo, R., Aguilar, B., y Gogichaishvili, A. (2014). El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: Una revisión. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2):365–376.
- Blakely, R. (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, capítulo The Geomagnetic Field. Cambridge University Press, 1a edición.
- Booth, C. A., Bai, S. Q., y Xue, Q. F. (2007). Environmental magnetism: measuring, monitoring and modelling urban street dust pollution. *Geophysical Journal International*, 571:568–580.
- Butler, R. (2004). *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. University of Portland. Edición electrónica.
- Caballero, C. (2011). La fábrica magnética a partir de la anisotropía de susceptibilidad magnética (ams): Sus bases generales y ejemplos como auxiliar para determinar direcciones, fuentes y

- dinámicas de flujo. En *Monografías del Instituto de Geofísica*, volumen 16, capítulo Magnetización y susceptibilidad: Conceptos básicos, p. 13. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Campbell, W. H. (2003). *Introduction to geomagnetic fields*, capítulo The Earth's main field, pp. 4–7. Cambridge University Press, 2a edición.
- Cejudo, R., Bautista, F., Aguilar, B., y Gogichaishvili, A. (2015a). Correlación entre elementos potencialmente tóxicos y propiedades magnéticas en suelos de la ciudad de México para la identificación de sitios contaminados: definición de umbrales magnéticos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1):50–61.
- Cejudo, R., Gogichaishvili, A., Bautista, F., Delgado, C., Quintana, P., Aguilar, D., Ramos, S., Morales, J., Soler, A. M., Cossio, I., Hernández, A., y López, H. (2015b). Caracterización magnética de polvo urbano y plantas de la zona metropolitana del valle de México. *Latinmag Letters*, 5(5):1–16.
- Dearing, J. (1999). *Environmental Magnetic Susceptibility. Using the Bartington MS2 System*. British Library, 2a edición.
- Evans, M. y Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism. Principles and Applications of Environmental Magnetism*, volumen 86. Academic Press.
- Lanza, R. y Meloni, A. (2006). *The earth's magnetism. An introduction for geologists*. Springer.
- Liu, Q., Roberts, A. P., Larrasoana, J. C., Banerjee, S. K., Guyodo, Y., Tauxe, L., y Oldfield, F. (2012). Environmental magnetism: Principles and applications. *Reviews of Geophysics*, 50(RG4002):1–2.
- López, F. (2007). Metodología de evaluación de riesgos y vulnerabilidad de suelos por actividades no industriales en el distrito federal. Tesis de maestría, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco.
- Lu, S., Bai, S., y Xue, Q. (2007). Magnetic properties as indicators of heavy metals pollution in urban topsoils: a case study from the city of Luoyang, China. *Geophysical Journal International*, 17(2):568–580.
- Martínez, E. (2009). Propiedades magnéticas y sus relaciones con metales pesados y elementos mayores en suelos superficiales del valle de México. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Morton, O., Hernández, E., Martínez, E., Soler, A., Lozano, R., González, E., Beramendi, L., y Urrutia, J. (2009). Mexico city topsoils: Heavy metals vs. magnetic susceptibility. *Geoderma*, 151:121–125.
- Oda, H., Yamamoto, Y., Zhao, X., Bijaksana, S., y Liu, Q. (2016). Special issue on “recent advances in environmental magnetism and paleomagnetism. *Earth, Planets and Space*, 68(59):1–3.
- Sánchez, A., Bautista, F., Gogichaishvili, A., Reyes, J. A., Solis, F. A., Romero, S., Herrera, Ase-neth and Sánchez, I. M., Cejudo, R., y Morales, J. J. (2016). Aumento magnético en suelos superficiales de la conurbación binacional Mexicali-Calexico. *Latinmag Letters*, 6(D19):1–7.
- Soler, A. (2007). *Investigaciones arqueomagnéticas en México -Fundamentos, Historia y Futuro*, capítulo Bases del método paleomagnético. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Tauxe, L. (2005). Lectures in paleomagnetism. <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/2005/>.
- Tauxe, L., Banerjee, S. K. Butler, R. F., y Van Der Voo, R. (2010). *Essentials of paleomagnetism*, capítulo Applied rock (environmental) magnetism. Scripps Institution of Oceanography, UC San Diego. Cuarta edición electrónica.
- Telford, W., Geldart, L., y Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*, capítulo Magnetic methods, pp. 62–73. Cambridge University Press, 2a edición.
- Versteeg, J., Morris, W., y Rukavina, N. (1995). The utility of magnetic properties as a proxy for mapping contamination in hamilton harbour sediments. *J. Great Lakes Res*, 21(1):71–83.

Apéndice A

Valores de medición del instrumento

Susceptibilidad magnética volumétrica (κ) [adimensional]			
Muestra	Frecuencia 976 [Hz]	Frecuencia 3904 [Hz]	Frecuencia 15616 [Hz]
43	2.83E-03	2.80E-03	2.72E-03
57	2.32E-03	2.30E-03	2.23E-03
77	4.83E-03	4.82E-03	4.72E-03
96	2.19E-03	2.17E-03	2.10E-03
101	3.36E-03	3.34E-03	3.26E-03
105	2.59E-03	2.57E-03	2.50E-03
118	3.56E-03	3.55E-03	3.48E-03
123	1.88E-03	1.87E-03	1.82E-03
125	5.81E-03	5.80E-03	5.70E-03
126	3.86E-03	3.85E-03	3.76E-03
127	2.80E-03	2.79E-03	2.73E-03
142	4.72E-03	4.70E-03	4.61E-03
147	4.01E-03	3.97E-03	3.84E-03
149	3.42E-03	3.40E-03	3.32E-03
169	5.04E-03	5.03E-03	4.93E-03
173	2.56E-03	2.54E-03	2.48E-03
176	3.37E-03	3.34E-03	3.25E-03
198	2.70E-03	2.68E-03	2.61E-03

199	4.21E-03	4.20E-03	4.12E-03
201	5.24E-03	5.22E-03	5.13E-03
222	2.69E-03	2.68E-03	2.62E-03
225	2.23E-03	2.19E-03	2.11E-03
226	3.68E-03	3.68E-03	3.60E-03
228	3.44E-03	3.43E-03	3.36E-03
248	2.80E-03	2.79E-03	2.72E-03
249	2.77E-03	2.76E-03	2.70E-03
252	2.28E-03	2.27E-03	2.21E-03
253	2.86E-03	2.83E-03	2.76E-03
255	4.48E-03	4.47E-03	4.39E-03
257	4.47E-03	4.47E-03	4.38E-03
274	3.28E-03	3.26E-03	3.17E-03
275	2.40E-03	2.39E-03	2.35E-03
279	3.19E-03	3.18E-03	3.10E-03
281	8.26E-03	8.26E-03	8.14E-03
283	2.71E-03	2.70E-03	2.63E-03
299	3.64E-03	3.62E-03	3.52E-03
301	2.80E-03	2.76E-03	2.66E-03
304	1.65E-03	1.65E-03	1.61E-03
306	2.69E-03	2.68E-03	2.61E-03
320	3.82E-03	3.80E-03	3.71E-03
325	1.95E-02	1.95E-02	1.91E-02
334	3.08E-03	3.05E-03	2.94E-03
340	5.83E-03	5.83E-03	5.72E-03
342	2.90E-03	2.87E-03	2.79E-03
343	1.46E-02	1.44E-02	1.39E-02
351	2.82E-03	2.82E-03	2.75E-03
353	5.78E-03	5.76E-03	5.63E-03
355	3.48E-03	3.46E-03	3.36E-03

357	2.99E-03	2.92E-03	2.76E-03
360	3.96E-03	3.94E-03	3.86E-03
370	4.75E-03	4.75E-03	4.64E-03
371	2.42E-03	2.37E-03	2.25E-03
389	2.20E-03	2.17E-03	2.07E-03
393	5.12E-03	5.10E-03	4.97E-03
394	4.78E-03	4.77E-03	4.67E-03
404	2.26E-03	2.25E-03	2.19E-03
405	1.97E-03	1.96E-03	1.91E-03
406	1.57E-02	1.57E-02	1.54E-02
408	3.80E-03	3.79E-03	3.69E-03
409	3.56E-03	3.55E-03	3.46E-03
421	6.49E-03	6.48E-03	6.35E-03
424	1.57E-03	1.54E-03	1.47E-03
437	4.46E-03	4.45E-03	4.35E-03
438	1.19E-02	1.18E-02	1.17E-02
455	2.69E-03	2.68E-03	2.60E-03
457	6.68E-03	6.67E-03	6.44E-03
472	4.28E-03	4.27E-03	4.18E-03
473	4.05E-03	4.04E-03	3.94E-03

Tabla A.1: Valores obtenidos al medir la susceptibilidad volumétrica de cada muestra a tres frecuencias distintas.

Mediciones de Magnetización Remanente Natural]				
Muestra	MRN_x [mA/m]	MRN_y [mA/m]	MRN_z [mA/m]	MRN [A/m]
43	-7.85	1.32	17.93	0.019617589
57	-2.85	-12.58	3.54	0.013375743
77	-0.37	-5.54	1.29	0.057002281
96	-3.7	-15.28	9.08	0.018155297
101	-2.02	-3.36	-0.52	0.039547946

105	1.56	-2.81	0.47	0.032481687
118	1.86	-3.21	2.14	0.042829079
123	2.49	-0.86	1.74	0.031571031
125	0.64	-2.19	0.7	0.023865666
126	0.53	-2.09	1.29	0.025125883
127	-2.5	-5.36	-1.38	0.060732199
142	6.19	-5.34	-0.79	0.08213148
147	-2.64	-9.74	12.39	0.015979653
149	-0.86	-2.59	2.33	0.03588398
169	2.49	-3.13	0.65	0.040520982
173	-1.01	-2.29	0.4	0.025346006
176	2.11	-2.68	0.98	0.035489294
198	0.56	-1.85	2.21	0.029360177
199	1.41	-3.86	1.2	0.042810863
201	-2.86	-3.8	2.39	0.05322753
222	0.87	-8.77	3.89	0.009633374
225	-0.76	-16.54	11.95	0.020419395
226	7.44	-8.06	-2.73	0.113035437
228	0.32	-4.54	2.88	0.053859447
248	-1.82	-4.41	-2.96	0.056144546
249	-2.2	-1.37	0.5	0.026394886
252	-13.84	-17.07	12.06	0.025067391
253	0.36	-14.78	5.23	0.015682184
255	13.33	-19.4	-4.82	0.024026679
257	1.6	-6.94	7.63	0.104374566
274	7.27	-8.98	12.42	0.016963187
275	3.82	-10.9	-1.36	0.011629789
279	0.11	-2.78	0.97	0.029464216
281	1.64	-5.47	-1.89	0.060151974
283	2.4	-2.36	3.1	0.045759808

299	14.3	5.59	11.71	0.01930964
301	-8.86	-18.95	-2.44	0.021060762
304	4.96	-1.18	-4.61	0.068735799
306	0.93	-4.87	2.55	0.055753296
320	2.77	-3.81	6.58	0.08092305
325	2.69	-8.47	2.92	0.093543252
334	-0.68	-3.96	0.31	0.040299007
340	1.8	-3.61	1.65	0.043582795
342	1.15	-2.69	-2.08	0.035895682
343	7.59	-8.56	3.07	1.18451087
351	-7.78	1.08	9	0.119454929
353	3.98	-14.73	7.88	0.017172877
355	0.6	-5.28	0.42	0.053305534
357	-2.06	-18.22	6.48	0.019447427
360	3.58	-3.46	4.05	0.064179825
370	4.76	-2.53	-0.27	0.053973512
371	-7.71	-12.68	11.49	0.018768234
389	-2.88	-2.33	-1.64	0.040512837
393	7.61	-18.06	11.88	0.022917463
394	2.57	-2.85	1.56	0.041425837
404	3.42	-13.32	-0.67	0.013768359
405	-2.1	-1.28	-1.25	0.275878596
406	0.51	-7.78	-0.29	0.078020895
408	-2.7	-1.07	-0.71	0.02989816
409	1.82	-2.17	0.13	0.02835172
421	1.2	-3.09	2.27	0.040175863
424	-2.36	-14.49	3.47	0.015085443
437	-2.14	-0.04	0.12	0.214373506
438	0.71	-5.6	9.26	0.108448928
455	2.01	-12.69	-1.2	0.012904116

457	2.44	-5.68	1.93	0.064761794
472	-3.83	-6.41	-0.16	0.07468775
473	0.47	-2.98	0.27	0.030288942

Tabla A.2: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Natural de cada muestra

Magnetización Remanente Anhisterética [A/m] (campo de AC de 120 [mT])				
Muestra	MRA_x	MRA_y	MRA_z	MRA
43	-7.33	0.27	0.33	0.734239062
57	-6.18	0	0.07	0.618039643
77	-9.79	0.03	-0.04	0.979012768
96	-6.54	0.1	0.07	0.654113904
101	-9.43	0.4	-0.03	0.943852743
105	-6.87	0.02	0.07	0.687038572
118	-6.41	-0.01	0.1	0.641078778
123	-4.86	0	0.03	0.486009259
125	-8.27	0	0.03	0.827005441
126	-6.55	0.14	0.01	0.655150364
127	-5.96	-0.12	-0.13	0.596262526
142	-9.2	0.19	0.01	0.920196718
147	-11.72	0.24	0.04	1.172252533
149	-7.61	0.05	0.04	0.761026938
169	-8.85	0.13	-0.07	0.885123155
173	-7.54	0.04	0	0.75401061
176	-9.48	0	0.15	0.948118663
198	-6.5	-0.09	0.15	0.650235342
199	-9.33	-0.07	0.09	0.933069665
201	-6.77	0.02	0.21	0.677328576
222	-7.81	0.22	0.09	0.781361632
225	-7.39	-0.02	0.07	0.739035858

226	-6.21	0.04	0.15	0.621194012
228	-4.85	-0.06	0.01	0.485038143
248	-4.75	0.02	0.15	0.475240991
249	-5.03	-0.04	0.01	0.503016898
252	-8.22	0.43	0.1	0.823184669
253	-7.14	0.02	0.09	0.714059521
255	-7.73	-0.11	0.24	0.773450709
257	-10.15	-0.22	0.09	1.015278287
274	-4.39	0.06	0.01	0.439042139
275	-6.62	-0.14	0.09	0.662209181
279	-8.48	0.18	0.15	0.848323641
281	-9.08	0.38	0.14	0.908902635
283	-7.82	0.06	0.17	0.782207773
299	-9.88	-0.14	0.04	0.988107282
301	-3.16	0.03	-0.01	0.316015822
304	-5.72	-0.12	0.05	0.572147708
306	-7.07	-0.08	0.22	0.707387447
320	-14.71	0.03	0.19	1.471125759
325	-10.83	0.3	0.07	1.083438046
334	-8.1	0.06	0.12	0.810111103
340	-7.78	0.19	0.16	0.778396429
342	-14.66	-7.57	6.81	1.78492745
343	-6.33	0.27	0.41	0.63490078
351	-7.46	0.09	0.11	0.746135376
353	-8.16	-0.11	0.02	0.81607659
355	-15.79	0.04	0.21	1.579144705
357	-7.71	-0.13	0.21	0.771395489
360	-9.07	0.08	0.13	0.907128436
370	-10.69	0.44	0.01	1.069905603
371	-9.56	0.49	-0.17	0.95740587

389	-10.84	0.16	0.06	1.084134678
393	-8.19	0.06	0.15	0.819159325
394	-4.92	-0.04	0.05	0.492041665
404	-15.24	-7.47	6.58	1.820315632
405	-4.33	-0.09	-0.04	0.433111995
406	-17.07	0.55	0.03	1.707888462
408	-8.39	-0.01	0.03	0.839005959
409	-7.06	0.04	0.03	0.706017705
421	-7.54	0.01	0.03	0.754006631
424	-7.14	0.12	0.04	0.714112036
437	-10.34	0.15	-0.06	1.034126201
438	-12.53	0.28	-0.19	1.25345682
455	-5.88	0.07	-0.06	0.588072274
457	-11.43	0.16	0.14	1.143197708
472	-8.65	-0.03	0.4	0.865929558
473	-8.71	0.13	0.08	0.871133744

Tabla A.3: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Anhisterética de cada muestra expuesta a un campo, de corriente alterna, de 120 mT.

Magnetización Remanente Anhisterética [A/m] (campo de AC de 20 [mT])				
Muestra	MRA_x	MRA_y	MRA_z	MRA
126	-2.54	-0.08	0.02	0.254133823
201	-3.27	-0.24	0.23	0.32868526
257	-2.91	-0.17	0.16	0.291934924
320	-2.4	0.01	0.01	0.240004167
360	-2.7	-0.11	0.12	0.270490296
409	-2.47	-0.05	0.04	0.247082982
472	-3	-0.1	0.29	0.301564255

Tabla A.4: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Anhisterética de cada muestra expuesta a un campo, de corriente alterna, de 20 mT.

Magnetización Remanente Anhisterética [A/m] (campo de AC de 40 [mT])				
Muestra	MRA_x	MRA_y	MRA_z	MRA
126	-4.37	-0.04	0.02	0.437022883
201	-5.67	-0.13	0.21	0.567537664
257	-5.02	-0.06	0.13	0.502204142
320	-4.32	0.01	0.04	0.432019675
360	-4.93	-0.09	0.1	0.493183536
409	-4.54	0.05	0.07	0.45408149
472	-5.19	-0.01	0.16	0.519247532

Tabla A.5: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Anhisterética de cada muestra expuesta a un campo, de corriente alterna, de 40 mT.

Magnetización Remanente Anhisterética [A/m] (campo de AC de 60 [mT])				
Muestra	MRA_x	MRA_y	MRA_z	MRA
126	-5.33	-0.05	0.02	0.533027204
201	-7.17	-0.1	0.11	0.717154098
257	-6.13	0.01	0.13	0.613138647
320	-5.4	0.01	0.08	0.540060182
360	-6.15	-0.03	0.12	0.615124378
409	-5.63	-0.12	0.03	0.563135863
472	-6.37	0.04	0.08	0.637062791

Tabla A.6: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Anhisterética de cada muestra expuesta a un campo, de corriente alterna, de 60 mT.

Magnetización Remanente Anhisterética [A/m] (campo de AC de 80 [mT])				
Muestra	MRA_x	MRA_y	MRA_z	MRA
126	-5.92	-0.01	0.03	0.592008446
201	-8.14	0.03	0.17	0.814183026
257	-6.89	-0.1	0.13	0.689195183
320	-6.12	-0.01	0.11	0.612099665
360	-6.87	0.1	0.12	0.687177561
409	-6.32	-0.03	0.03	0.63201424
472	-6.92	-0.22	0.07	0.692385009

Tabla A.7: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Anhisterética de cada muestra expuesta a un campo, de corriente alterna, de 80 mT.

Magnetización Remanente Anhisterética [A/m] (campo de AC de 100 [mT])				
Muestra	MRA_x	MRA_y	MRA_z	MRA
126	-6.36	0.01	0.2	0.636315173
201	-8.89	0.06	0.13	0.889115291
257	-7.44	0.18	0.01	0.744218382
320	-6.55	0.07	0.13	0.655166391
360	-7.39	0.02	0.17	0.739198214
409	-6.8	-0.04	0	0.680011765
472	-7.02	-0.2	0.27	0.702803671

Tabla A.8: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Anhisterética de cada muestra expuesta a un campo, de corriente alterna, de 100 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (campo de 1000 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
43	-4.19	-0.01	0.07	41.90596616
57	-3.75	-0.12	0	37.51919509
77	-7.89	-0.21	0.26	78.97075408
96	-2.94	0.02	-0.01	29.40085033
101	-6.08	0.04	0.07	60.80534516
105	-4.79	-0.05	0.02	47.90302704
118	-4.44	-0.07	0.03	44.40653105
123	-2.84	-0.09	0.03	28.41584065
125	-4.56	-0.12	0.03	45.61677323
127	-4.41	-0.07	0.04	44.107369
142	-6.39	-0.11	0.11	63.91893303
147	-7.05	-0.2	0.04	70.52949738
149	-5.3	-0.08	0.08	53.0120741
169	-5.71	-0.06	0.06	57.10630438
173	-2.42	-0.03	-0.02	24.2026858
176	-4.85	-0.07	0.01	48.50515437
198	-4.29	-0.1	0.06	42.91584789
199	-5.1	-0.05	0.04	51.00401945
222	-4.65	0.07	0.05	46.50795631
225	-4.3	0.04	0.03	43.00290688
226	-4.6	-0.02	0.03	46.00141302
228	-4.3	-0.16	0.05	43.03266201
248	-3.58	-0.11	0.03	35.81815182

249	-3.52	-0.04	0.04	35.20454516
252	-2.8	-0.07	0.07	28.01749453
253	-3.48	-0.13	0.04	34.82657032
255	-5.86	-0.12	0.16	58.63411976
274	-6.41	-0.35	-0.06	64.19828658
275	-3.19	-0.11	0.03	31.92036967
279	-4.57	-0.33	-0.01	45.81910082
281	-7.36	-0.17	-0.01	73.61969845
283	-6.7	-0.17	0.05	67.02342874
299	-5.5	-0.27	0.08	55.07204372
301	-3.66	-0.06	-0.43	36.85661406
304	-2.02	-0.06	-0.25	20.36295656
306	-2.95	-0.1	-0.39	29.77347813
325	-10.07	-0.21	-1.16	101.3876718
334	-4.07	-0.15	-0.46	40.98658317
340	-4	-0.17	-0.46	40.29950372
342	-3.47	-0.02	-0.39	34.91904924
343	-13.53	-0.51	-1.67	136.4221023
351	-3.8	-0.07	-0.42	38.23780851
353	-5.44	-0.1	-0.64	54.78430432
355	-3.33	0.08	-0.37	33.51447448
357	-4.17	-0.19	-0.51	42.0536562
370	-5.06	-0.13	-0.55	50.91463444
371	-4.11	-0.16	-0.53	41.47119482
389	-2.81	0.06	-0.3	28.26605738
393	-3.69	-0.09	-0.4	37.12707907
394	-4.08	-0.06	-0.51	41.12189198
404	-2.01	-0.03	-0.22	20.22226496
405	-2.37	-0.1	-0.34	23.96351393
406	-8.47	-0.03	-0.94	85.22053743

408	-4.91	-0.06	-0.56	49.42195868
421	-5.51	0	-0.67	55.50585555
424	-2.34	0.11	-0.27	23.58092449
437	-6.03	-0.13	-0.73	60.75417681
438	-7.26	0	-0.93	73.19323739
455	-19.65	-0.18	1.69	19.72336178
457	-4.42	-0.07	0.56	44.55883751
473	-4.78	-0.13	0.08	47.82436617

Tabla A.9: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de 61 muestras expuestas a pulsos de campo de 1000 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (campo inverso 100 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
43	4.84	-0.24	-9.08	10.29221065
57	4.17	0.12	-8.06	9.075621191
77	1.25	0.16	-2.1	24.49101876
96	3.71	-0.15	-6.83	7.77402727
101	0.73	-0.05	-1.35	15.35545506
105	0.59	0.01	-1.07	12.21924711
118	0.56	-0.08	-1.19	13.17611475
123	3.24	-0.3	-5.5	6.390430345
125	0.61	0.04	-1.13	12.84756786
127	0.6	-0.01	-1	11.66233253
142	0.79	-0.09	-1.51	17.0654622
147	4.33	-0.06	-6.88	8.129384971
149	0.6	-0.03	-1.14	12.88603896
169	0.81	-0.03	-1.44	16.52452722
173	3.91	0.14	-7.41	8.379486858
176	0.58	-0.02	-0.97	11.30353927

198	5.56	0.19	-9.74	11.2168311
199	0.7	0	-1.22	14.06556078
222	0.59	0	-1.09	12.39435355
225	4.5	-0.25	-8.17	9.330669858
226	0.71	0.02	-1.26	14.46409347
228	0.5	0.01	-0.92	10.47138959
248	5.1	0.27	-9.82	11.06866297
249	4.75	-0.12	-8.9	10.0889494
252	4.2	0.04	-7.68	8.75351358
253	3.25	-1.57	-8.3	9.050823167
255	0.78	-0.03	-1.43	16.29171569
274	0.76	-0.06	-1.46	16.47057983
275	4.71	0.06	-7.94	9.232079939
279	0.76	0.1	-1.19	14.15521105
281	1.09	-0.05	-2.06	23.31137062
283	0.75	-0.01	-1.46	16.4140184
299	0.74	-0.02	-1.35	15.39642816
301	4.7	0.31	-8.5	9.71782383
304	3.92	-0.05	-7.73	8.667283311
306	5.61	0.21	-8.72	10.37085339
325	2	-0.1	-3.8	42.95346319
334	5.02	-0.28	-8.48	9.858458297
340	0.71	-0.07	-1.37	15.44635879
342	4.95	-0.01	-9.22	10.46475036
343	2.19	-0.16	-4.45	49.62277703
351	0.74	0.02	-1.33	15.22136656
353	0.97	-0.03	-1.8	20.44944987
355	0.61	0.02	-1.16	13.10763136
357	4.35	-0.09	-6.96	8.208057017
370	0.89	0.01	-1.75	19.63338993

371	3.1	-0.36	-5.77	6.559916158
389	4.24	-0.14	-7.43	8.555822579
393	0.77	0	-1.29	15.02331521
394	0.65	-0.11	-1.31	14.66526508
404	3.74	0.55	-6.96	7.920334589
405	4.37	0.13	-7.52	8.698517115
406	1.61	-0.11	-3.09	34.86014917
408	0.8	-0.06	-1.52	17.18720454
421	1.12	0.01	-1.94	22.40111604
424	2.48	0.38	-4.93	5.531699558
437	1.12	-0.02	-1.93	22.31524143
438	1.58	0.1	-2.68	31.1268373
455	3.23	-0.05	-5.9	6.7264701
457	0.83	-0.02	-1.69	18.82923259
473	0.67	-0.03	-1.43	15.79461934

Tabla A.10: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de 61 muestras expuestas a pulsos de campo inverso de 100 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (campo inverso 200 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
43	0.74	-0.02	-1.43	16.10248428
57	0.66	0	-1.26	14.22392351
77	1.58	0.04	-2.7	31.28577952
96	0.56	-0.01	-1.05	11.90042016
101	1.08	0.02	-2.12	23.79327636
105	0.9	0	-1.6	18.35755975
118	0.81	-0.06	-1.54	17.41062894
123	5.2	0.06	-9.06	10.44639651
125	0.87	0.03	-1.5	17.34301012

127	0.87	-0.01	-1.48	17.16799348
142	1.17	-0.07	-2.14	24.39959016
147	1.07	0.02	-1.86	21.45903073
149	0.97	0.08	-1.8	20.46289325
169	1.05	-0.02	-1.99	22.50111108
173	5.38	0.27	-9.55	10.96447901
176	0.87	0.02	-1.59	18.1256724
198	0.8	0.06	-1.48	16.83448841
199	0.99	0.07	-1.79	20.46729098
222	0.88	0.03	-1.6	18.26280373
225	2.87	0.05	-0.04	28.70714197
226	3.77	0.05	-0.07	37.70981305
228	3.13	0.03	-0.05	31.30543084
248	2.61	0.09	-0.01	26.11570409
249	2.54	0.15	-0.04	25.44739672
252	1.98	0	-0.01	19.80025252
253	3.03	-0.08	-0.21	30.38321905
255	4.27	0.2	-0.14	42.76973229
274	6.02	0.07	-0.12	60.21602777
275	2.91	-0.04	-0.01	29.10292082
279	4.49	0.09	0.04	44.91080048
281	6.87	0.14	-0.18	68.73783529
283	5.9	-0.11	-0.12	59.02245335
299	4.96	0.12	-0.07	49.61945183
301	3.67	0.14	-0.03	36.72791854
304	2.03	-0.01	-0.04	20.30418676
306	2.93	-0.12	0.05	29.32882541
325	9.78	-0.02	-0.26	97.83475865
334	3.36	0.02	-0.03	33.60193447
340	3.73	0.05	-0.09	37.31420641

342	2.94	0.01	-0.05	29.40442144
343	12.35	0.09	-0.25	123.5285797
351	3.57	0.08	-0.03	35.71022263
353	5.07	0.09	-0.05	50.71045257
355	3.09	0	-0.05	30.90404504
357	2.52	0.16	-0.01	25.25094058
370	4.73	0.14	-0.08	47.32747616
371	3.18	-0.01	-0.05	31.80408779
389	2.43	-0.04	-0.01	24.30349769
393	3.47	0.03	-0.04	34.70360212
394	3.74	-0.04	-0.08	37.41069366
404	18.54	0.63	0.13	18.5511563
405	2.2	0.05	0	22.00568108
406	8.18	-0.08	-0.02	81.80415637
408	4.62	0.17	-0.08	46.23818768
421	5.33	0.13	-0.1	53.32522855
424	18.66	0.48	-0.27	18.66812524
437	5.61	0.35	-0.03	56.20987458
438	6.94	0.05	0	69.40180113
455	17.06	0	-0.23	17.06155034
457	4.19	-0.01	0	41.90011933
473	4	-0.04	-0.11	40.01712134

Tabla A.11: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de 61 muestras expuestas a pulsos de campo inverso de 200 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (campo inverso 300 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
43	3.12	0.06	-0.07	31.21361882
57	2.31	0.04	-0.02	23.1043286

77	6.01	0.2	-0.05	60.13534734
96	2.35	-0.03	-0.04	23.50531855
101	4.57	-0.28	-0.1	45.7966156
105	3.62	-0.06	-0.04	36.20718161
118	3.38	0.09	-0.07	33.8192253
123	2.1	0.04	-0.02	21.00476136
125	3.36	-0.05	-0.02	33.6043152
127	3.36	0	-0.01	33.60014881
142	4.84	0.02	-0.12	48.41528684
147	4.87	-0.23	-0.05	48.75684567
149	3.92	0.02	-0.07	39.20675962
169	4.28	0.02	-0.08	42.80794319
173	2.14	0.06	-0.02	21.40934375
176	3.6	0	-0.04	36.00222215
198	3.19	-0.03	-0.03	31.90282119
199	3.9	0.04	-0.03	39.003205
222	3.46	0.09	-0.05	34.61531453
225	3.19	-0.1	-0.05	31.91958646
226	3.99	0.07	-0.1	39.91866731
228	3.28	0.02	-0.08	32.81036422
248	2.73	0	-0.03	27.3016483
249	2.69	0.16	-0.06	26.95422045
252	2.19	0.02	-0.06	21.90913052
253	2.57	0.05	-0.19	25.77498788
255	4.54	0.02	-0.14	45.42202109
274	5.24	0.05	-0.11	52.41392945
275	2.41	0	-0.03	24.10186715
279	3.74	0.03	0.04	37.4033421
281	5.73	0.26	-0.18	57.38719369
283	5	-0.12	-0.15	50.03688639

299	4.17	-0.01	-0.07	41.70599477
301	3.45	0.06	-0.02	34.50579661
304	2.1	0.03	-0.06	21.01071155
306	2.88	0.05	0.01	28.80451354
325	9.99	0.4	-0.34	100.0378428
334	3.8	0.05	-0.07	38.00973559
340	3.89	0.13	-0.14	38.94688691
342	3.31	0.01	-0.06	33.10558865
343	13.06	0.07	-0.3	130.6363273
351	3.66	0.02	-0.09	36.61161018
353	5.3	-0.01	-0.09	53.00773528
355	3.19	0.09	-0.06	31.91833329
357	3.73	0.09	-0.08	37.31943194
370	4.9	0.14	-0.1	49.03019478
371	3.76	0.03	-0.09	37.61196618
389	2.65	-0.11	-0.04	26.52583646
393	3.6	-0.03	-0.05	36.00472191
394	3.89	-0.06	-0.06	38.9092534
404	19.47	0.09	-0.15	19.47078581
405	2.32	0.02	-0.02	23.20172407
406	7.42	0.31	-0.11	74.27287526
408	4.84	0.02	-0.07	48.4054749
421	5.44	0.13	-0.16	54.43904849
424	2.14	0.05	-0.03	21.40794245
437	5.88	0.06	-0.09	58.80994814
438	7.21	0.11	0.02	72.10866799
455	18.25	0.22	-0.38	18.25528143
457	4.31	0.13	-0.09	43.12899257
473	4.47	-0.06	-0.13	44.72292477

Tabla A.12: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de 61 muestras expuestas a pulsos de campo inverso de 300 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (pulsos de campo de 25 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
126	-2.42	0.02	0.01	24.20103304
201	-2.17	-0.02	0.05	21.706681
257	-10.58	-0.6	-0.16	10.5982074
320	-7.68	-0.19	-0.04	7.682454035
360	-8.82	-0.01	0.08	8.820368473
409	-8.24	-0.3	-0.13	8.246484099
472	-8.68	-0.19	-0.48	8.695337831

Tabla A.13: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de siete muestras seleccionadas expuestas a pulsos de campo de 25 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (pulsos de campo de 50 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
126	-2.42	0.01	0.01	24.20041322
201	-2.81	-0.05	0.06	28.110852
257	-2.34	-0.04	-0.03	23.40534127
320	-17.05	-0.11	-0.1	17.05064808
360	-2.07	-0.03	0.01	20.70241532
409	-18.46	-0.69	-0.06	18.47298839
472	-1.92	0.01	-0.09	19.2213423

Tabla A.14: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de siete muestras seleccionadas expuestas a pulsos de campo de 50 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (pulsos de campo de 75 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
126	-2.44	-0.05	0	24.40512241
201	-3.89	-0.16	0.08	38.94110938
257	-3.23	0.02	-0.01	32.30077398
320	-2.37	-0.02	0	23.70084387
360	-2.91	-0.06	0	29.10618491
409	-2.58	-0.04	-0.01	25.80329436
472	-2.74	-0.06	-0.12	27.43282705

Tabla A.15: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de siete muestras seleccionadas expuestas a pulsos de campo de 75 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (pulsos de campo de 100 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
126	-2.6	-0.07	0.01	26.00961361
201	-4.55	-0.21	0.07	45.55381433
257	-3.69	0.02	0	36.900542
320	-2.78	0.02	-0.01	27.80089927
360	-3.41	-0.13	0.01	34.12491758
409	-2.99	-0.12	-0.03	29.92557435
472	-3.09	0	-0.1	30.916177

Tabla A.16: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de siete muestras seleccionadas expuestas a pulsos de campo de 100 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (pulsos de campo de 200 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
126	-3.17	-0.08	0.02	31.71072374
201	-5.55	-0.06	0.11	55.51414234
257	-4.48	-0.17	-0.03	44.83324659
320	-3.45	-0.11	-0.03	34.51883544
360	-4.16	-0.07	0.01	41.60600918
409	-3.65	-0.19	-0.02	36.5499658
472	-3.82	-0.07	-0.14	38.23205461

Tabla A.17: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de siete muestras seleccionadas expuestas a pulsos de campo de 200 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (pulsos de campo de 300 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
126	-3.3	-0.16	0.01	33.03891645
201	-5.82	-0.02	0.1	58.20893402
257	-4.68	-0.05	-0.01	46.8027777
320	-3.65	-0.02	-0.01	36.50068493
360	-4.34	-0.04	0.04	43.40368648
409	-3.8	-0.12	-0.03	38.02012625
472	-4.12	-0.05	-0.13	41.22353697

Tabla A.18: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de siete muestras seleccionadas expuestas a pulsos de campo de 300 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (pulsos de campo de 500 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
126	-3.38	-0.05	0.01	33.80384594
201	-5.93	-0.19	0.12	59.34256482
257	-4.79	-0.07	-0.05	47.9077238
320	-3.68	0.06	0.01	36.80502683
360	-4.47	-0.18	0.08	44.7433794
409	-3.9	-0.21	-0.03	39.0576497
472	-4.33	-0.13	-0.13	43.33901245

Tabla A.19: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de siete muestras seleccionadas expuestas a pulsos de campo de 500 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (pulsos de campo de 700 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
126	-3.41	0	0.02	34.10058651
201	-6.06	-0.38	0.17	60.74281851
257	-4.84	-0.09	-0.05	48.41094917
320	-3.73	-0.03	0	37.30120641
360	-4.53	-0.09	0.05	45.31169827
409	-3.95	0.03	-0.03	39.50227842
472	-4.83	-0.09	-0.06	48.31211028

Tabla A.20: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de siete muestras seleccionadas expuestas a pulsos de campo de 700 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (pulsos de campo de 800 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
126	-3.43	0.01	0.02	34.30072886
201	-5.63	-0.17	0.14	56.34305636
257	-4.89	-0.1	-0.03	48.91114392
320	-3.78	0.03	0.02	37.80171954
360	-4.53	0	0.04	45.30176597
409	-3.95	-0.1	-0.03	39.51379506
472	-4.86	-0.25	-0.09	48.67257955

Tabla A.21: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de siete muestras seleccionadas expuestas a pulsos de campo de 800 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (pulsos de campo de 1000 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
126	-3.45	-0.12	0.01	34.5210081
201	-6.08	-0.07	0.13	60.81792499
257	-4.91	-0.09	0.04	49.10987681
320	-3.78	-0.01	0.01	37.80026455
360	-4.59	0.07	0.06	45.90925833
409	-3.97	0.01	-0.03	39.70125943
472	-4.89	-0.19	-0.06	48.94057621

Tabla A.22: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de siete muestras seleccionadas expuestas a pulsos de campo de 1000 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (campo inverso 100 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
126	2.24	-0.23	0	22.51777076
201	4.12	-0.05	0.01	41.20315522
257	3.29	0	0.02	32.9006079
320	2.34	0.05	-0.01	23.4055549
360	2.98	0.14	-0.03	29.83437615
409	2.73	0.12	0.02	27.32709278
472	3.3	0	0.04	33.00242415

Tabla A.23: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de siete muestras seleccionadas expuestas a pulsos de campo inverso de 100 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (campo inverso 200 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
126	3.07	-0.04	0.01	30.7027686
201	5.49	0.19	0.01	54.93295914
257	4.4	0	-0.02	44.00045454
320	3.33	-0.02	0	33.3006006
360	4.07	-0.09	-0.03	40.71105501
409	3.57	-0.08	-0.01	35.70910248
472	4.39	0.12	0.05	43.91924407

Tabla A.24: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de siete muestras seleccionadas expuestas a pulsos de campo inverso de 200 mT.

Mediciones de Magnetización Remanente Isotermal [A/m] (campo inverso 300 [mT])				
Muestra	MRI_x	MRI_y	MRI_z	MRI
126	3.27	0.06	0	32.70550412
201	5.79	-0.21	0.01	57.93815668
257	4.69	-0.02	-0.02	46.90085287
320	3.58	0.07	-0.03	35.80809964
360	4.33	0.12	-0.05	43.31951062
409	3.79	0.05	0.02	37.90382566
472	4.65	-0.08	0.02	46.50731125

Tabla A.25: Valores obtenidos al medir la Magnetización Remanente Isotermal de siete muestras seleccionadas expuestas a pulsos de campo inverso de 300 mT.

Apéndice A

Valores de medición normalizados

Valores de Susceptibilidad Magnética Específica χ [m^3/kg]	
Muestra	χ
43	2.96335E-06
57	2.70554E-06
77	4.40593E-06
96	2.36757E-06
101	3.27805E-06
105	2.64286E-06
118	3.84345E-06
123	2.48185E-06
125	4.32775E-06
126	4.04718E-06
127	3.16832E-06
142	4.2427E-06
147	3.10853E-06
149	2.87395E-06
169	5.02743E-06
173	2.47942E-06
176	3.19431E-06
198	2.45734E-06

199	4.60739E-06
201	4.76364E-06
222	2.23237E-06
225	2.64688E-06
226	3.87368E-06
228	3.83821E-06
248	3.69028E-06
249	3.60325E-06
252	2.72646E-06
253	2.55642E-06
255	4.57143E-06
257	4.24199E-06
274	2.79744E-06
275	2.8614E-06
279	0.00000352
281	8.74074E-06
283	2.33369E-06
299	3.70013E-06
301	2.84625E-06
304	2.18182E-06
306	2.8579E-06
320	4.08011E-06
325	1.64384E-05
334	2.94737E-06
340	4.59961E-06
342	3.05665E-06
343	8.58824E-06
351	2.7715E-06
353	4.60558E-06
355	3.49749E-06

357	2.49167E-06
360	3.72268E-06
370	4.16667E-06
371	2.88095E-06
389	2.52511E-06
393	3.94986E-06
394	3.79742E-06
404	2.44324E-06
405	2.13261E-06
406	1.45202E-05
408	3.51852E-06
409	3.79228E-06
421	4.71571E-06
424	2.00319E-06
437	3.46408E-06
438	1.04615E-05
455	2.85411E-06
457	5.19339E-06
472	3.35357E-06
473	3.35057E-06

Tabla A.1: Valores obtenidos al normalizar la susceptibilidad magnética medida a baja frecuencia por la densidad de cada una de las 68 muestras.

Valores de Magnetización Remanente Natural y Anhisterética [Am^2/kg]		
Muestra	MRN	MRA_{120}
43	2.0542E-05	0.000768837
57	1.55985E-05	0.000720746
77	5.19975E-05	0.000893056
96	1.96273E-05	0.00070715

101	3.85834E-05	0.000920832
105	3.31446E-05	0.00070106
118	4.62392E-05	0.000692123
123	4.16779E-05	0.000641596
125	1.7777E-05	0.000616019
126	2.63443E-05	0.00068692
127	6.8721E-05	0.000674696
142	7.3826E-05	0.000827143
147	1.23873E-05	0.000908723
149	3.01546E-05	0.000639518
169	4.04199E-05	0.000882916
173	2.45482E-05	0.000730277
176	3.36391E-05	0.000898691
198	2.67214E-05	0.000591796
199	4.68518E-05	0.001021143
201	4.83887E-05	0.000615753
222	7.9945E-06	0.000648433
225	2.42367E-05	0.000877194
226	0.000118985	0.000653888
228	6.00942E-05	0.000541186
248	7.39961E-05	0.000626347
249	3.43348E-05	0.000654331
252	2.9976E-05	0.000984376
253	1.40176E-05	0.000638265
255	2.4517E-05	0.000789235
257	9.90506E-05	0.000963491
274	1.44675E-05	0.00037445
275	1.38656E-05	0.000789519
279	3.25122E-05	0.000936081
281	6.36529E-05	0.000961802

283	3.94056E-05	0.000673591
299	1.96286E-05	0.001004429
301	2.14087E-05	0.000321236
304	9.08903E-05	0.000756559
306	5.92332E-05	0.00075154
320	8.64332E-05	0.001571296
325	7.88563E-05	0.00091333
334	3.85636E-05	0.000775226
340	3.43848E-05	0.000614119
342	3.78347E-05	0.001881346
343	0.000696771	0.000373471
351	0.0001174	0.000733303
353	1.36836E-05	0.00065026
355	5.35734E-05	0.00158708
357	1.62062E-05	0.00064283
360	6.03336E-05	0.000852765
370	4.73452E-05	0.000938514
371	2.23431E-05	0.001139769
389	4.64997E-05	0.001244344
393	1.76798E-05	0.000631945
394	3.29103E-05	0.000390897
404	1.48847E-05	0.001967909
405	0.000298651	0.000468863
406	7.21581E-05	0.00157955
408	2.76835E-05	0.000776857
409	3.02016E-05	0.000752083
421	2.91923E-05	0.00054787
424	1.92478E-05	0.000911148
437	0.000166504	0.000803205
438	9.53397E-05	0.00110194

455	1.36914E-05	0.000623949
457	5.03493E-05	0.000888783
472	5.85213E-05	0.000678495
473	2.50581E-05	0.00072069

Tabla A.2: Valores obtenidos al normalizar la Magnetización Remanente Natural y Anhisterética por la densidad de cada una de las 68 muestras.

Valores de Magnetización Remanente Natural y Anhisterética				
Muestra	MRI_{000}	MRI_{-100}	MRI_{-200}	MRI_{-300}
43	0.043880593	0.010777184	0.01686124	0.032684418
57	0.043754163	0.010583815	0.016587666	0.026943823
77	0.072037176	0.022340724	0.028538909	0.054855505
96	0.031784703	0.008404354	0.012865319	0.025411155
101	0.059322288	0.014980932	0.023212953	0.044679625
105	0.04888064	0.01246862	0.018732204	0.036946104
118	0.047942274	0.014225225	0.0187969	0.036511984
123	0.037512661	0.008436212	0.013790622	0.027729058
125	0.033978974	0.009569883	0.012918443	0.025031147
127	0.049909328	0.013196416	0.019426301	0.03801997
142	0.057455221	0.015339741	0.021932216	0.043519359
147	0.054674029	0.006301849	0.016634908	0.037796004
149	0.044547961	0.010828604	0.017195709	0.032946857
169	0.056963895	0.016483319	0.022444999	0.04270119
173	0.023440858	0.008115726	0.01061935	0.020735442
176	0.04597645	0.010714255	0.017180732	0.034125329
198	0.039058792	0.01020872	0.015321491	0.02903556
199	0.055818352	0.015393227	0.022399224	0.042684766
222	0.038595814	0.010285771	0.015155854	0.028726402
225	0.051042026	0.011074979	0.034073759	0.03788675

226	0.04842254	0.015225362	0.03969454	0.04201965
228	0.048014128	0.011683559	0.034929351	0.036608496
248	0.04720679	0.014588024	0.034419379	0.035982403
249	0.04579453	0.013123837	0.033102305	0.035062401
252	0.03350373	0.01046758	0.023677432	0.026199259
253	0.031129895	0.008090121	0.027158185	0.023039095
255	0.059830734	0.0166242	0.043642584	0.046349001
274	0.054753336	0.014047403	0.051356953	0.044702712
275	0.038057073	0.011006951	0.034697968	0.02873546
279	0.050559008	0.015619543	0.049556745	0.041272653
281	0.077904443	0.024668117	0.07273845	0.060727189
283	0.057716623	0.014134784	0.050826655	0.043088815
299	0.055981747	0.015650753	0.050439087	0.042394912
301	0.037465427	0.009878347	0.037334606	0.035075778
304	0.026926224	0.01146087	0.026848511	0.027782759
306	0.031631849	0.011018171	0.031159443	0.030602405
325	0.08546906	0.036209453	0.08247398	0.084331164
334	0.039221611	0.009433931	0.032154961	0.036372953
340	0.03179448	0.012186476	0.029439216	0.030727327
342	0.036805322	0.01103004	0.030992803	0.034893901
343	0.080248295	0.029189869	0.07266387	0.076844898
351	0.037580156	0.014959574	0.035096042	0.035981926
353	0.043652832	0.016294382	0.040406735	0.042237239
355	0.033682889	0.013173499	0.031059342	0.032078727
357	0.035044714	0.006840048	0.02104245	0.031099527
370	0.04466196	0.017222272	0.04151533	0.043008943
371	0.04937047	0.007809424	0.037862009	0.04477615
389	0.032443107	0.009820169	0.027894976	0.030445723
393	0.028641912	0.011589829	0.026772306	0.027776063
394	0.032668832	0.011650657	0.029720511	0.030911026

404	0.021861908	0.008562524	0.020055304	0.021049498
405	0.025941558	0.009416527	0.023822118	0.025116887
406	0.078816682	0.0322406	0.075657023	0.068691677
408	0.045761073	0.015914078	0.042813137	0.044819884
421	0.04033123	0.016276924	0.03874676	0.039556075
424	0.030087304	0.00705799	0.02381898	0.027314759
437	0.04718771	0.017332226	0.043658155	0.04567763
438	0.064345703	0.027364253	0.061012572	0.063392236
455	0.020926644	0.007136838	0.018102441	0.019368999
457	0.034642439	0.014638859	0.032575409	0.033530801
473	0.039565143	0.013066903	0.033106202	0.036999317

Tabla A.3: Valores obtenidos al normalizar las mediciones de Magnetización Remanente Isotermal por la densidad de cada una de las 61 muestras seleccionadas.

Valores de Magnetización Remanente Anhisterética [Am^2/kg]					
Muestra	MRA_{20}	MRA_{40}	MRA_{60}	MRA_{80}	MRA_{100}
126	0.000266457	0.000458215	0.000558875	0.000620717	0.000667172
201	0.000298805	0.000515943	0.000651958	0.000740166	0.000808287
257	0.000277044	0.000476588	0.000581863	0.000654041	0.000706257
320	0.000256346	0.000461436	0.000576833	0.000653778	0.000699777
360	0.00025428	0.000463627	0.00057826	0.000645995	0.000694898
409	0.000263204	0.000483709	0.000599878	0.000673251	0.00072438
472	0.000236289	0.000406854	0.000499168	0.000542515	0.000550679

Tabla A.4: Valores obtenidos al normalizar las mediciones de Magnetización Remanente Anhisterética por la densidad de cada una de las siete muestras seleccionadas para el proceso detallado.

Valores de Magnetización Remanente Isotermal [Am^2/kg]				
Muestra	MRI_{25}	MRI_{50}	MRI_{75}	MRI_{100}
126	0.025374609	0.025373959	0.025588595	0.027270892
201	0.019733346	0.02555532	0.035401009	0.041412558
257	0.010057611	0.022211475	0.030653166	0.035018308
320	0.008205558	0.01821164	0.025314653	0.029693884
360	0.008291768	0.01946173	0.027361866	0.032079829
409	0.008784537	0.019678283	0.027486865	0.031878108
472	0.006813193	0.015060797	0.021494869	0.024224233

Tabla A.5: Valores obtenidos al normalizar las mediciones de Magnetización Remanente Isotermal por la densidad de cada una de las siete muestras seleccionadas para el proceso detallado.

Valores de Magnetización Remanente Isotermal [Am^2/kg]					
Muestra	MRI_{200}	MRI_{300}	MRI_{500}	MRI_{700}	MRI_{800}
126	0.033248465	0.034641066	0.035443089	0.035754219	0.035964067
201	0.050467402	0.052917213	0.053947786	0.055220744	0.05122096
257	0.042546379	0.044415447	0.045464032	0.045941589	0.046416269
320	0.03686925	0.038986045	0.03931111	0.039841075	0.040375668
360	0.039112582	0.040802525	0.042061931	0.042596191	0.042586854
409	0.038934717	0.0405008	0.041606018	0.042079657	0.042091925
472	0.029956556	0.032300519	0.03395809	0.037854739	0.038137183

Tabla A.6: Valores obtenidos al normalizar las mediciones de Magnetización Remanente Isotermal por la densidad de cada una de las siete muestras seleccionadas para el proceso detallado.

Valores de Magnetización Remanente Isotermal [Am^2/kg]				
Muestra	MRI_{1000}	MRI_{-100}	MRI_{-200}	MRI_{-300}
126	0.036195028	0.02360972	0.032191632	0.034291485
201	0.055289023	0.037457414	0.049939054	0.052671052
257	0.046604865	0.031222404	0.041756066	0.04450852
320	0.040374114	0.024999258	0.035568065	0.038246301
360	0.04315794	0.028046417	0.038271262	0.040723394
409	0.042291621	0.029110086	0.038038991	0.040376911
472	0.03834717	0.025858902	0.034412728	0.036440596

Tabla A.7: Valores obtenidos al normalizar las mediciones de Magnetización Remanente Isotermal por la densidad de cada una de las siete muestras seleccionadas para el proceso detallado.

Apéndice B

Resumen de parámetros magnéticos

Experimento	Tratamiento	Resultado
Obtención de curvas κ -T	Segunda derivada de Tauxe	Temperatura de Curie de los principales portadores magnéticos presentes en la muestra
Susceptibilidad Magnética Específica	$\chi = \kappa/\rho [m^3/kg]$	Los valores más elevados en este parámetro corresponderán a muestras que contienen minerales ferrimagnéticos y ferromagnéticos
Porcentaje de Susceptibilidad Magnética dependiente de la frecuencia	$\chi_{DF} \% = [(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})/\kappa_{lf}] * 100$	Indica la presencia y concentración de minerales ferrimagnéticos muy finos (superparamagnéticos)
Curvas MRA y MRI	Análisis del comportamiento de las curvas	Se emplean como indicadores de mineralogía ferrimagnética

Cociente S	$S_{-x} = MRI_{-x}/MRIS$	Permite determinar una medida relativa de la coercitividad de remanencia del material. Los valores cercanos a 1 indicarán que la muestra está dominada por minerales ferrimagnéticos
Cociente MRA/MRIS	$Cociente = \frac{MRA}{MRIS}$	Indicador de la granulometría y dominio magnético de las partículas minerales

Tabla B.1: Tabla resumen de experimentación, tratamiento y resultados