



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

"ESTUDIO DE MAGNETISMO DE ROCAS DE OBSIDIANAS
UTILIZADAS EN MEXICO PREHISPANICO"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

F I S I C A

P R E S E N T A :

MONICA PACHECO ROMAN



**FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM**

DIRECTORA DE TESIS: DRA. ANA MARIA SOLER ARECHALDE



**FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: Mónica Pacheco Román
FECHA: 03/NOV/04
FIRMA: Mónica Pacheco Román

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:
"ESTUDIO DE MAGNETISMO DE ROCAS DE OBSIDIANAS UTILIZADAS EN MEXICO PREHISPANICO"

realizado por Pacheco Román Mónica

con número de cuenta 9324914-2 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario

Ana María Soler Arechalde

Propietario

Drá. Ana María Soler Arechalde

Propietario

Drá. Elizabeth Solleiro Rebolledo

Suplente

Dr. Enrique Yépez Mulia

Suplente

Dr. Avtandyl Gogichaishvili

Dr. José Luis Ruvalcaba

Consejo Departamental de Física

Alicia Zarzosa Pérez
M. EN C. ALICIA ZARZOSA PEREZ
Coodinadora de Licenciatura

SECRETARÍA DE FÍSICA

**A mis padres
Arnulfo y Socorro**

Agradecimientos

A la Dra. Ana María Soler por su amistad, apoyo y por acercarme a esta Tierra desde la ciencia..

A la Dra. Elizabeth Solleiro por sus certeros comentarios y correcciones que ayudaron a mejorar este trabajo.

Al Dr. Enrique Yépez por enseñarme la otra cara de la Mecánica Cuántica, por escucharme y por todos sus comentarios. Gracias por tu amistad.

Al Dr. Avto Gogichaishvili por su atención y por los chocolates. Spasiba.

Al Dr. José Luis Ruvalcaba por la confianza.

Al Dr. Jaime Urrutia-Fucugauchi por el tiempo que se tomó para leer este trabajo y hacer valiosas sugerencias.

Índice

Índice	i
Introducción	1
1. Bases Geológicas	2
2. Fundamentos	2
2.1 Algunas definiciones	2
2.2 Campo magnético terrestre	4
3. Propiedades magnéticas de sólidos	4
3.1 Diamagnetismo	5
3.2 Paramagnetismo	5
3.3 Ferromagnetismo	5
3.3.1 Ferrimagnetismo y antiferromagnetismo	6
3.4 Minerales Magnéticos	7
4. Orígenes del magnetismo remanente natural	7
4.1 Dominios magnéticos	7
4.2 Histéresis en dominios magnéticos	9
4.2.1 Dominio sencillo (SD)	9
4.2.2 Granos multidominio (MD)	10
4.3 Relajación magnética y superparamagnetismo	10
4.4 Tipos de magnetización	11
5. Trabajo de campo	12
5.1 Elección de muestras	12
6. Trabajo de laboratorio	13
6.1 Susceptibilímetro	13
6.2 Magnetizador de pulsos	14
6.3 Magnetómetro	14
6.4 Micromag	15
7. Resultados	16
7.1 Análisis de datos (Durango y Sinaloa)	16
7.1.1 Susceptibilidad	16
7.1.2 Diagramas	17
7.1.3 Coloración	20
7.1.4 Dependencia de la susceptibilidad magnética con la temperatura	21
7.2 Análisis de datos (Otumba)	21
7.2.1 Susceptibilidad	21
7.2.2 Diagramas	22
7.2.3 Coloración	23
7.2.4 Dependencia de la susceptibilidad magnética con la temperatura	24
7.3 Análisis conjunto	25
8. Resultados generales	29
9. Conclusiones	31
10. Bibliografía	32
11. Apéndice	34

Introducción

Los estudios para determinar las fuentes o yacimientos de materiales encontrados en sitios arqueológicos, tales como basaltos u obsidias, son muy importantes para la arqueología ya que con estos datos se pueden determinar posibles rutas de intercambios entre las diferentes culturas del mundo. En particular en Mesoamérica la obsidiana es uno de los materiales más ampliamente empleados en la manufactura de objetos de uso cotidiano, en parte por la gran cantidad de yacimientos de fácil explotación y por otro lado, debido a su gran dureza y relativamente fácil manejo. Los análisis utilizados para la clasificación e identificación de las obsidias son: los de elementos traza, fluorescencia de rayos X, activación neutrónica y diversas espectroscopias (Murillo et al., 1998; Tenorio et al., 1998; Riciputi, et. al., 2002). Otra técnica ampliamente utilizada para estudiar las obsidias en Europa es el uso de métodos magnéticos (McDougall et al., 1983; Scorzelli et al., 2001; Stewart et al., 2003). La ventaja de los métodos magnéticos con respecto a los mencionados anteriormente es que son técnicas no destructivas, de menores costos y se pueden obtener resultados rápidamente (Tarling, 1983). Sin embargo, en México únicamente existe el trabajo de Urrutia-Fucugauchi (1999).

El objetivo de este trabajo es caracterizar magnéticamente obsidias de la Faja Volcánica Transmexicana utilizadas por las culturas del México Prehispánico, para lo cual se analizaron muestras de dos zonas del país: noroeste y centro. Un grupo fue entregado para su análisis por la Dirección de Salvamento Arqueológico a través del Arqlgo. Luis Alfonso Grave, que corresponden a las muestras de Sinaloa y Durango, muestras provenientes tanto de recuperación de fragmentos en excavación, como también nódulos en zonas aledañas. El segundo grupo es proveniente de la visita a los talleres prehispánicos¹ de Otumba, Edo. de México bajo la dirección del Arqlgo. Luis Morett.

¹ Se le llama de esta manera al yacimiento debido a que se ha explotado desde la época prehispánica (L. Morett *dixit*).

1. Bases geológicas

La extrusión de magma a la superficie de la tierra puede resultar en un enfriamiento tan rápido que la cristalización en el material no se produce. La tasa de enfriamiento requerida para que se impida la formación de cristales depende de la composición del magma y especialmente del contenido de sílice SiO_2 y agua H_2O (Stewart, 1979). Prácticamente las lavas ricas en sílice se enfrían rápidamente produciéndose un líquido altamente viscoso denominado *vidrio volcánico*. La obsidiana es un vidrio de composición riolítica². Los vidrios desde el punto de vista de la mineralogía son materiales *metaestables*, por lo que al paso del tiempo tienden a cristalizar en una forma más estable; a este proceso se le conoce como *devitrificación* (Pastrana, 1988). La obsidiana tiene como características principales: dureza de 5-5.5 en la escala de Mohs, presenta fractura concoidea³, tiene lustre vítreo y una amplia gama de colores tales como el negro, rojo, verde, azul, dorado y blanco. En cortes laminares delgados, puede ser translúcida. Salvo algunas impurezas menores, la mayoría de las obsidianas tienen una composición homogénea e isotrópica (Vásquez, et. al. 2001).

2. Fundamentos

2.1 Algunas definiciones básicas

1. El *momento magnético* es causado por corrientes eléctricas y se define como el vector $\mathbf{M} = IAn$, donde I es la corriente que circula en el circuito, A es el área del mismo y \mathbf{n} la dirección del vector normal unitario (figura 2.1a). El momento magnético está cuantizado, es decir, son múltiplos del valor fundamental (magnetón de Bohr) $M_B = 9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$ (Butler, 1992).
2. La intensidad de *magnetización* \mathbf{J} , de un material se define como el momento dipolar magnético neto por unidad de volumen, por lo que esta es una función vectorial que proporciona una descripción macroscópica de las corrientes atómicas interiores de la materia (Reitz, et. al., 1986).

Para calcular la magnetización de un volumen dado, se tienen que sumar vectorialmente los momentos magnéticos y se dividen entre el volumen que ocupa:

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

² La componente química más abundante en las rocas ígneas es el sílice y una forma de clasificar a las lavas que les dan origen es según la concentración de este elemento. Las lavas riolíticas son las que tienen sílice en concentración >63% (Cas & Wright, 1993).

³ Se denomina fractura concoidea a las superficies circulares concéntricas (Whitten & Brooks, 1980) que se obtienen al golpear un material con un instrumento filoso en una dirección específica.

La *magnetización inducida* J_i , es la que adquiere un material al ser expuesto a un campo magnético H . La relación entre H y J_i : $J_i = \chi H$. La cantidad χ , se conoce como *susceptibilidad magnética* es adimensional, y es un escalar cuando J_i y H son paralelas. La susceptibilidad magnética en general es un tensor, dependiendo de la isotropía y linealidad del material; para materiales no lineales la susceptibilidad depende de la intensidad del campo magnético y para materiales no homogéneos depende de la posición. La *magnetización remanente* J_r , es la resultante de las magnetizaciones a las que ha estado sujeto el material desde su proceso de formación hasta el presente. La magnetización se mide en A/m.

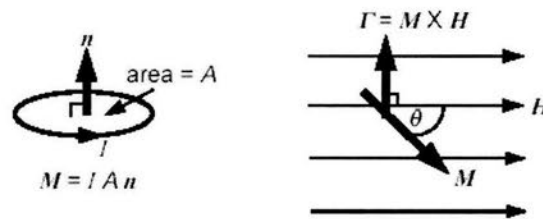


Figura 2.1: (a) Momento magnético en un circuito cerrado y (b) alineación de M con el campo magnético H . (Butler, 1992).

3. La fuerza total F sobre una partícula de carga q , que se mueve a velocidad v en presencia de campo eléctrico E y campo magnético o *inducción magnética* B , está dada por la fuerza de Lorentz: $F = q(E + v \times B)$. Dado que la intensidad de magnetización J no está determinada para cada posición sino que depende del campo B , se introduce un vector auxiliar de *intensidad magnética* H : $H = \frac{1}{\mu_0} B - M$, donde μ_0 es la permeabilidad del vacío.

Si se tiene un momento magnético M libre de rotar, entonces existe una torca Γ que alineará M en la dirección del campo H , lo cual queda determinado por la siguiente ecuación: $\Gamma = M \times H$ (figura 2.1b). Las unidades de H son las mismas que las de B y M (A/m).

4. Se denomina *flujo magnético* Φ a la integral del campo magnético en una superficie: $\Phi = \oint_S B \cdot dS$ y se mide en Webers (Wb).

2.2 Campo magnético terrestre

El campo magnético terrestre (CMT) puede describirse en cualquier posición de la superficie terrestre por medio de tres elementos: *declinación* (D), *inclinación* (I) e *intensidad* (H). La declinación D es el ángulo azimutal entre la componente horizontal de H , y el norte geográfico ($0^\circ < D < 360^\circ$). La inclinación está determinada por el ángulo entre H y el plano horizontal del sitio. Se define la inclinación del ecuador magnético con valor cero, mientras que los polos son aquellos en que la inclinación es máxima. Los polos magnéticos son : norte ($I = 90^\circ$) y sur ($I = -90^\circ$). La inclinación se relaciona con la longitud geográfica λ : $\tan I = 2 \tan \lambda$.

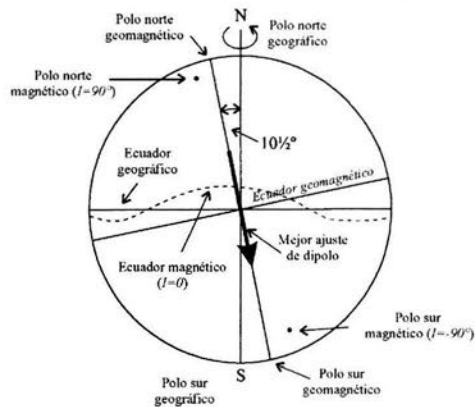
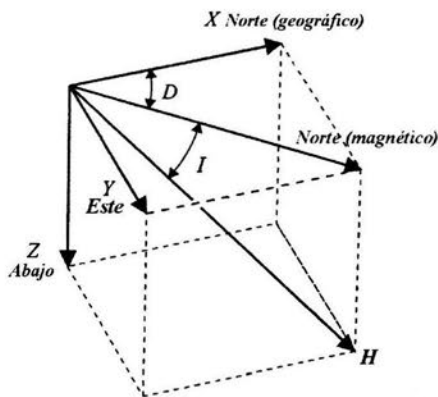


Figura 2.2 Componentes del vector H y Figura 2.3 Modelo del DAG. (Modificadas de McElhinny & McFadden, 2000).

Para explicar el comportamiento del campo magnético terrestre, la mejor aproximación es el modelo del *dipolo axial geocéntrico* (DAG). En este modelo el dipolo magnético está inclinado 10.5° (McElhinny & McFadden, 2000) respecto al eje de rotación de la Tierra.

3. Propiedades magnéticas de los sólidos

Algunos átomos, tienen momentos magnéticos atómicos (mma) debido al movimiento y espín de sus electrones orbitales⁴. Existen tres tipos fundamentales de propiedades magnéticas observables en los experimentos de magnetización adquirida y se explican a continuación.

⁴ Los elementos sólidos de transición (principalmente los portadores de hierro), poseen momento magnético debido a que no tienen lleno el orbital 3d.

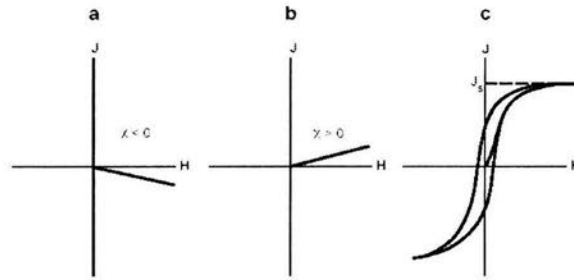


Figura 3.1 Tipos de magnetizaciones para materiales: (a) diamagnéticos, (b) paramagnético y (c) ferromagnéticos. (Butler, 1992).

3.1 Diamagnetismo

La respuesta *diamagnética* a la aplicación de un campo magnético (fig. 3.1a), es la adquisición de una pequeña magnetización inducida, opuesta a la dirección del campo aplicado. En estos materiales las órbitas electrónicas están llenas y la presión de los electrones orbitales cuando se colocan en un campo magnético, hace que se alineen en dirección contraria al campo aplicado. A los materiales compuestos de átomos que no presentan *mma*, muestran únicamente una respuesta diamagnética y se clasifican como materiales diamagnéticos.

3.2 Paramagnetismo

Los materiales *paramagnéticos* contienen átomos en los que tienen *mma* permanentes (que no interactúan con los *mma* adyacentes), y adquieren una magnetización inducida paralela al campo aplicado (fig. 3.1b). En este tipo de materiales, los *mma* actúan independientemente del campo magnético aplicado y de la energía térmica, ya que para temperaturas mayores a la del cero absoluto, la energía térmica hace vibrar a la red cristalina, haciendo que los *mma* oscilen rápida y aleatoriamente en la orientación. En ausencia de campo aplicado, los *mma* están distribuidos en todas las direcciones haciendo que la magnetización inducida se anule.

3.3 Ferromagnetismo

Los sólidos *ferromagnéticos* poseen átomos con *mma* que sí interactúan con los *mma* adyacentes, esto quiere decir que los átomos individuales tienen más electrones de valencia libres de moverse permitiéndoles interactuar fuertemente con otros. El interacción entre los electrones es tal que los espines se alinean *aun en ausencia de campo aplicado*. Esto se ve en su capacidad para “grabar” la dirección del campo magnético aplicado, ya que al remover el campo, la magnetización no se hace cero como se esperaría en otro tipo de materiales. Los materiales ferromagnéticos presentan un *ciclo* o

curva de histéresis (fig. 3.1c) en la susceptibilidad. La forma de la curva de histéresis es característica de cada material, pero también depende el valor máximo del campo aplicado. El valor de J_r (M_r) donde el campo aplicado es cero se llama *remanencia* y la magnitud de H en donde la magnetización se anula, se llama *fuerza de coerción* o *coercitividad* del material H_c , análogamente al caso de la magnetización, se denomina *coercitividad de remanencia* (H_{cr}) a la coercitividad en campo cero.

Para un material y temperatura dados, se tiene un valor máximo en la magnetización, a la que se le denomina *magnetización de saturación*, J_s (M_s). La magnetización de saturación se observa que decrece al aumentar la temperatura⁵, llegando al valor cero en la *temperatura o punto de Curie*, T_C , la cual es característica del tipo de material ferromagnético. Si la temperatura es mayor a T_C , el material se comporta como material paramagnético.

3.3.1 Ferrimagnetismo y antiferromagnetismo

Algunas sustancias se caracterizan por presentar una subdivisión en dos subredes (denominadas usualmente como A y B), y sus momentos atómicos se encuentran alineados pero tienen direcciones antiparalelas entre sí. El efecto ferromagnético de una red se cancela por efecto de la otra cuando los momentos de la subredes son iguales, y no se presenta un momento magnético neto; a este fenómeno se le llama *antiferromagnetismo*. Estos materiales no tienen temperatura crítica de Curie, pero el ordenamiento de los mma se destruye en la *temperatura de Néel*, por encima de la cual se comportan como sustancias paramagnéticas.

Si los mma de las subredes A y B son desiguales, no se presenta la magnetización espontánea y se presenta un débil comportamiento ferromagnético, al cual se le conoce como *ferrimagnetismo*. Un subcaso que no se considera en todos los libros es el *antiferromagnetismo débil* o *de canto*, que se observa cuando en las subredes los mma no tienen una dirección exactamente antiparalela. Tanto los materiales ferrimagnéticos como los antiferromagnéticos débiles se comportan como ferromagnéticos, por lo que tienen las mismas propiedades que éstos. Otro tipo de materiales ferromagnéticos son los *superparamagnéticos* (secc. 4.3).

⁵ En este punto, la agitación térmica destruye el proceso de alineación de los momentos.

3.4 Minerales magnéticos

El hierro es un material común en todas las rocas terrestres, pero no aparece en su estado natural, sino en forma de óxidos o hidróxidos de hierro. A temperaturas por debajo de los 900°C, los óxidos de hierro contienen frecuentemente titanio y forman series sólidas, la composición de las cuales puede verse gráficamente en el diagrama ternario (fig. 3.2). En este diagrama, pueden distinguirse dos tipos principales de minerales magnéticos: los minerales magnéticos fuertes como la *magnetita* (Fe_3O_4) y sus soluciones sólidas con *ulvoespinela* (Fe_2TiO_4), las cuales se conocen como *titanomagnetitas*; los otros son los minerales magnéticos débiles basados en la *hematita* ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) y sus soluciones sólidas como la *ilmenita* (FeTiO_3) conocidas como *titanohematitas*.

Si el magma ígneo se enfría, los óxidos de hierro tienden a retener las composiciones de las soluciones sólidas de alta temperatura. Estos normalmente corresponde a la composición de las titanomagnetitas pero cae entre la serie de las titanomagnetitas y las titanohematitas, dependiendo de las condiciones de oxidación. En las rocas pobres en sílice, sus composición está más cerca de la serie de las titanomagnetitas, mientras que para las rocas ricas en sílice o *ácidas*, como las obsidianas, tienen una composición que se acerca más a las series de las titanohematitas.

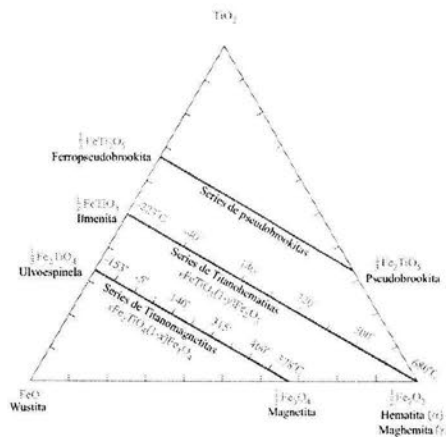


Figura 3.2 Diagrama Ternario. (Modificada de McElhinny & McFadden, 2000).

4. Orígenes del magnetismo remanente natural

4.1 Dominios magnéticos

Una roca está formada por finos granos de minerales ferromagnéticos dispersos en una matriz de minerales paramagnéticos y diamagnéticos. Sin importar que tan sencilla o compleja sea la combinación de energías que controlan la magnetización, los granos siempre tienden a buscar la

configuración que minimice la energía total del sistema. A la energía almacenada en una distribución de momentos magnéticos debido a la repulsión de los mma opuestos adyacentes se le denomina *energía magnetostática*, e_m , y debido a esta distribución es que se produce un campo magnético interno al grano ferromagnético.

La formación de *dominios magnéticos* dentro del grano disminuye la energía magnética debido a que el porcentaje de superficie cubierta por cargas magnéticas se reduce y las cargas de signos opuestos son adyacentes en vez de separados (fig. 4.1).



Figura 4.1 División de un grano en dominios magnéticos. (Butler, 1992).

Al ser menor el tamaño de grano, también disminuye el número de dominios magnéticos; es decir, por debajo de cierto tamaño no es energéticamente favorable subdividir un grano en muchos dominios, al contrario, resulta ser más estable que el grano contenga un solo dominio o *dominio sencillo* (SD). Análogamente, si resulta más estable en términos energéticos que se formen muchos dominios, entonces el grano se denomina *multidominio* (MD). Por debajo del diámetro umbral de grano d_0 , las partículas son SD; este tamaño depende de factores como son la anisotropía de forma de grano y la magnetización de saturación⁶.

Cuando un dominio SD de gran tamaño pasa a ser MD, se le denomina *dominio pseudo sencillo* (PSD). Al pasar de un dominio a otro adyacente, el vector del mma , gira gradualmente desde su dirección original a otra nueva en el curso de unos 100 átomos. Esta región entre los dominios se llama *pared de dominio* o *de Bloch*, las distancias entre las paredes depende del material.

Por último, al hablar de dominios es importante mencionar que existen direcciones preferenciales en las cuáles el material adquiere la magnetización, esto se debe a que existe una *anisotropía magnetocrystalina*, y tiene que ver con la dependencia de los intercambios de energía en la dirección cristalográfica de magnetización. Este fenómeno es el que domina la coercitividad a nivel macroscópico.

⁶ Las rocas ígneas y sus sedimentos derivados, generalmente tienen una fracción de granos de magnetita con tamaños de grano en el rango de SD.

4.2 Histéresis en dominios magnéticos

4.2.1 Dominio sencillo (SD)

La magnetización individual de las partículas ferromagnéticas, j_n , se suma vectorialmente y se divide entre el volumen de la partícula individual v_n , de la misma manera que para la magnetización de la muestra completa. Al aplicar un campo magnético inicial en una dirección arbitraria, se obtiene una magnetización adquirida paralela a la del campo aplicado, siguiendo el camino 0-1-2; conforme se aplica el campo, las magnetizaciones de los dominios sencillos j_s , comenzarán a orientarse con el campo debido a la energía de interacción (figura 4.2) en el punto 1 de la gráfica. Si el campo aplicado

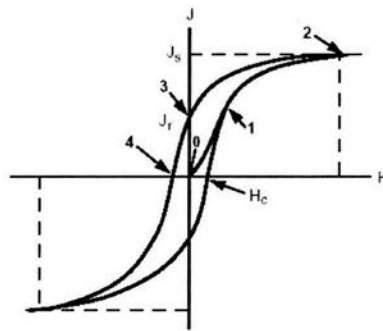


Figura 4.2 Ciclo de histéresis para una muestra de ejemplo (Modificada de Butler, 1992).

se incrementa lo suficiente, puede ser que todos los granos se alineen con el campo punto 2, por lo que la muestra alcanza la *magnetización de saturación*, J_s . La magnetización de saturación depende linealmente de la concentración de los minerales ferromagnéticos. Para que la magnetización J_r se haga cero, se necesita aplicar un campo opuesto en dirección, camino 3-4. Al campo necesario para hacer que J se anule es le llama *fuerza coercitiva*, H_c , y este valor no depende de la concentración de material ferromagnético.

Los granos ferromagnéticos de dominio sencillo SD, son eficientes al contraer magnetización remanente y se opone a la desmagnetización.

4.2.2 Granos multidominio (MD)

Al aplicar un campo magnético a un grano MD se producen direcciones preferenciales de crecimiento de los dominios con magnetización paralela al campo. Si el campo aplicado es suficientemente intenso, las paredes de dominio son destruidas, y la magnetización alcanza la saturación. Al quitar el campo, los dominios se vuelven a formar y se mueven en la dirección inicial. La energía de la pared

de dominio depende de la posición debido a las imperfecciones de la red. En vez de regresar a sus posiciones originales, se obtiene una pequeña magnetización remanente. Debido a que se requiere un campo magnético de poca intensidad para llevar a las paredes de los dominios a la posición de momento cero, la fuerza de coerción de las partículas ferromagnéticas MD también es pequeña. Además la magnetización de las partículas MD tienden a decaer con el tiempo, por lo que este tipo de partículas resulta poco eficiente para “grabar” información magnética comparando con los granos SD; por el contrario, los granos PSD resultan ser importantes portadores del remanencia magnética.

El análisis de los ciclos de histéresis en los estudios magnéticos es de gran utilidad, ya que la respuesta de la magnetización al campo aplicado puede dar información sobre la mineralogía de la muestra, tamaño y forma de las partículas constituyentes, estado de dominio, así como de las interacciones entre las partículas (Tauxe, et. al., 1996). Para realizar este análisis se grafican los cocientes de magnetización M_{rs}/M_s y H_{cr}/H_c en escala logarítmica (diagramas de Day) que dan valores de diagnóstico para los dominios, si son sencillos, multidominios o pseudosencillos (Xu, et. al., 1997; Gee & Kent, 1999; Dunlop, 2002).

4.3 Relajación magnética y superparamagnetismo

Un efecto directamente relacionado con la activación térmica es la *relajación magnética*, en donde la magnetización de los granos de SD decae en el tiempo. El decaimiento de la magnetización remanente está dado por: $J_r(t) = J_{r0} \exp(-t/\tau)$, donde J_r , es la magnetización remanente inicial, t el tiempo y τ el tiempo de relajación característico. El tiempo de relajación depende del volumen del grano, la temperatura y la coercitividad microscópica h_c .

Los granos de SD con tiempos de relajación cortos se denominan *superparamagnéticos*, este tipo de materiales presentan una fuerte magnetización. Pero la magnetización en este tipo de granos es inestable, ya que decae a cero casi inmediatamente después que se remueve el campo. Por convención se toma un *tiempo de relajación crítico*, τ_s , de 100 segundos para poder determinar el tamaño y la forma de los granos SD mediante la relación de $\tau < \tau_s$. A este tamaño se le llama *umbral superparamagnético* (d_s). El tiempo de relajación tiene una fuerte dependencia con la temperatura, ya que para variaciones de algunas decenas de grados, τ puede variar en varios órdenes de magnitud. A la temperatura en que ocurre esta transición, se denomina *temperatura de bloqueo*, T_B . El comportamiento superparamagnético también puede determinarse por medio de los diagramas de Day.

4.4 Tipos de magnetización

La *magnetización remanente natural* (NRM), es la magnetización existente en una roca previa a cualquier tratamiento en el laboratorio. Depende del campo geomagnético y de los procesos geológicos (formación e historia) de la roca. La NRM puede tener más de una componente, la adquirida durante la formación de la roca se denomina *NRM primaria*, y la *NRM secundaria*, adquirida posterior a su formación. Debido a lo expuesto anteriormente la NRM es la suma vectorial de sus componentes: $NRM = NRM \text{ primaria} + NRM \text{ secundaria}$. Existen tres tipos básicos de NRM primaria: la *magnetización termorremanente* (TRM), la *magnetización química o de cristalización remanente* (CRM) y la *magnetización detrítica remanente* (DRM); pero la magnetización primaria que se utiliza en el desarrollo de este trabajo es la TRM.

TRM

La *magnetización termorremanente* (TRM) es adquirida por las rocas durante el proceso de enfriamiento de la temperatura de Curie T_C , a la temperatura ambiente. Al enfriarse desde una alta temperatura, se produce magnetización espontánea que aparece en T_C , y llega a una magnetización de equilibrio en presencia de un campo aplicado. Conforme la temperatura desciende de T_C pasando por T_B , el tiempo de relajación de los granos se incrementa rápidamente. La magnetización de equilibrio se “congela” y cambios posteriores en la dirección del campo que ocurran por debajo de la temperatura de bloqueo T_B , no alteran la dirección de la magnetización remanente.

La TRM no se adquiere únicamente en el punto de Curie T_C , sino en todo un rango de temperaturas de bloqueo que van desde el punto de Curie hasta la temperatura ambiente. La TRM total puede considerarse como adquirida en diferentes intervalos de temperaturas más frías, la fracción total de TRM adquirida en estos intervalos de temperatura se denomina *magnetización termorremanente parcial* (PTRM) para cada intervalo de temperatura. Entonces, la TRM es igual a la suma de las PTRMs adquiridas en cada intervalo consecutivo de temperaturas entre las temperaturas de Curie y ambiente. Inversamente, al recalentar una muestra a cualquier temperatura $T < T_C$, la magnetización original de los granos con temperatura de bloqueo menores que T se destruyen.

La adquisición de TRM tiene que ver con la activación térmica de los granos de la roca, de modo que la energía que impide que se borre la magnetización en los granos puede ser superada. Es decir, la TRM puede destruirse por medio de un calentamiento hasta el punto de Curie, y posteriormente un enfriamiento fuera de un campo aplicado. Este tipo de magnetización se da en la mayoría de las rocas

ígneas, puede ser estable a escala de tiempo geológica y resistente a los efectos de campos magnéticos posteriores al enfriamiento original.

IRM

Magnetización remanente isotermal (IRM). Este tipo de magnetización es resultado de la breve exposición a un campo magnético intenso a temperatura constante. En el laboratorio la IRM se obtiene por la exposición a temperatura ambiente a un campo magnético generado por un electroimán. La IRM es la forma de remanencia producida en los experimentos de histéresis, y es adquirida por los granos ferromagnéticos con coercitividad menor que el campo aplicado. La IRM natural puede tener componentes secundarias de IRM debido a la exposición de campos magnéticos pasajeros producto de relámpagos.

Al graficar los cambios en la remanencia conforme aumenta el campo aplicado en el laboratorio se observa la *curva de adquisición de IRM*. Para cierto tipo de materiales puede observarse una magnetización de saturación (SIRM), y una vez alcanzada esta magnetización la muestra se expone a campos inversos de intensidad creciente hasta que la remanencia se haga cero en la coercitividad de remanencia.

5. Trabajo de campo

5.1 Elección de muestras

Para este trabajo se utilizaron muestras del noroeste y centro del país. De la zona noroeste se utilizaron 24 muestras provenientes de 13 sitios de los estados de Durango (12 muestras) y Sinaloa (12 muestras), proporcionadas por la Dirección de Salvamento Arqueológico del INAH, de dos tipos: (1) nódulos encontrados en diferentes localidades de ambos estados; se contaron con uno (1,11,13), dos (2,3,4,5,8,9,10,12) o tres (7) especímenes por muestra (ver apéndice) y (2) una muestra arqueológica con dos especímenes (muestra 6) del sitio arqueológico El Calón, Sinaloa (22°44.6' N, 105°43.6' W). Las fuentes de Durango y Sinaloa aún no han sido identificadas.

Las muestras del Estado de México (ver apéndice) fueron colectadas *in situ* por la autora de este trabajo en los talleres arqueológicos ubicados en el yacimiento de obsidiana (19°40.527' N, 98°40.656' W) aledaño al pueblo de Buenavista y cercano a Otumba. Las muestras se colectaron en etapas, es decir, se fueron recogiendo de la superficie al subir por el cerro por uno de los flancos hasta bajar por otro. Se observaron notorias diferencias físicas en las obsidias principalmente la

coloración dependiendo de la altura a la que se encontraron; en la parte baja del cerro se encontraron obsidianas de tonos rojos a cafés, mientras que en las partes superiores el color predominante fue el color gris. Una primera clasificación de las 30 muestras seleccionadas fue por el color de las obsidianas (ver apéndice).

6. Trabajo de laboratorio

Las obsidianas utilizadas presentan formas irregulares y en algunos casos son muy pequeñas, por lo que fue necesario colocarlas dentro cubos de plástico con algodón para evitar posibles movimientos de las mismas. Las dimensiones de los cubos son 2 cm de lado, con capacidad de 8 cm³. Debido a los notorios cambios en la coloración de las muestras tanto de Hidalgo como de Durango y Sinaloa, se hizo una descripción del color con las tablas Munsell (2000), comparando los colores de las obsidianas y las diferentes combinaciones de colores base de las tablas: rojo, amarillo, verde, azul y púrpura. El objetivo de esta descripción fue para ver si existe algún patrón que pueda ofrecer un criterio previo a las pruebas de carácter magnético.

6.1 Susceptibilímetro

Para medir la susceptibilidad magnética se utilizó el susceptibilímetro Bartington MS2. Este aparato funciona mediante el principio de inducción de corriente alterna. Se suministra energía a un circuito oscilador dentro del sensor MS2B de frecuencia⁷ dual, generando un campo magnético alterno de baja intensidad (~ 80 A/m). Cualquier material dentro de este campo, tendrá cambios en su frecuencia de oscilación. Estos cambios en la frecuencia vuelven al medidor del MS2 en forma de un pulso, donde se convierte en un valor para la susceptibilidad magnética. El sensor de este aparato tiene la ventaja de que no somete a la muestra a un campo de saturación, por lo que se puede medir la susceptibilidad de la muestra sin destruir su NRM.

También se realizó la prueba de susceptibilidad-temperatura, para lo cual se conectó el sensor MS2W, que es un horno que trabaja con un sistema de bombeo de agua para evitar un posible calentamiento indeseado del equipo. Este horno tiene una cavidad de 30 mm de diámetro por donde circula el agua alrededor de la probeta que contiene a la muestra colocada sobre un cojín de fibra de vidrio de cuarzo.⁸ Inicialmente la muestra se encuentra a temperatura ambiente, y se incrementó la temperatura hasta una

⁷ Las frecuencias en que opera el sensor MS2B son 0.465 kHz para baja frecuencia y 4.65 kHz para la alta frecuencia.

⁸ El cuarzo es un material diamagnético por lo que no afecta las mediciones realizadas.

temperatura máxima alrededor de 600 °C, y posteriormente se disminuyó la temperatura hasta el valor mínimo de 50 °C. Se tomaron los datos con intervalos de temperatura de un grado en ambos casos, esto se hizo con el paquete de cómputo GeolabSoft.

6.2 Magnetizador de pulsos

El magnetizador de pulsos ASC Scientific IM-10, fue utilizado para aplicar un campo magnético directo en una dirección fija en la orientación de la muestra, para obtener una magnetización secundaria IRM. La muestra se colocó dentro de la cavidad del aparato y se le aplicaba un pulso de campo. Se aumentó la intensidad del campo desde 10 mT hasta 1 T (en ocho pasos intermedios) y se medía cada vez la intensidad de magnetización, para observar el comportamiento de la muestra y ver la magnetización de saturación, en caso de haberla, y relacionarla con la magnitud del campo aplicado. Posteriormente se repitió el proceso descrito pero en una posición apuntando a 180° de la inicial; al realizar este proceso la magnetización disminuye hasta llegar al valor cero. Al seguir aumentando la magnitud del campo aplicado en esta dirección, la muestra puede llegar de nuevo a una magnetización de saturación.

6.3 Magnetómetro

El magnetómetro AGICO JR6 de giro de velocidad dual, se utilizó para medir la intensidad de la magnetización de las muestras después de aplicarles el campo para obtener las NRM e IRM, respectivamente. Cada muestra se coloca en cuatro posiciones diferentes respecto a una dirección fija. El principio de funcionamiento de este aparato es hacer girar la muestra a velocidad angular constante dentro de un par de bobinas aisladas, en éstas se induce un voltaje de corriente alterna, cuya amplitud y fase depende de la magnitud y dirección del vector de magnetización remanente de la muestra. Este voltaje es amplificado, filtrado y digitalizado. Al digitalizarlo se obtienen los valores de la intensidad, declinación e inclinación del vector de magnetización. Para calcular la intensidad de magnetización el programa promedia las magnetizaciones (M_x , M_y , M_z) en cada dirección de los ejes coordenados y calcula la norma del vector M .

6.4 Micromag

Las 18 muestras utilizadas para el análisis de micromuestras en un Micromag 2900 se seleccionaron de acuerdo a su coloración, susceptibilidad y NRM con valores representativos: 7 de Otumba, 7 de

Durango y 4 de Sinaloa. El Micromag 2900 es un magnetómetro de gradiente alterno de alta sensibilidad, controlado por una computadora. Usa una técnica modificada de la magnetometría convencional de muestra vibrante. Para ello en lugar de vibrar a una frecuencia constante mediante un transductor electromecánico, produce un gradiente del campo alterno para producir una fuerza periódica sobre la muestra que es colocada en un campo. La muestra está montada en una extensión unida a un elemento piezoeléctrico. El gradiente del campo alterno ejerce una fuerza alterna sobre la muestra que es proporcional a la magnitud del gradiente del campo y al momento magnético de la muestra. El resultado es una deflexión en la extensión que es transmitida al elemento piezoeléctrico. Se registra una medida cada 10 ms.

De cada una de las muestras se obtuvo su ciclo de histéresis y el proceso de magnetización remanente isothermal, ambos con campo máximo de 1.2 T. Cada muestra debe pesar menos de 10 mg y de estos análisis se obtuvieron los parámetros M_{rs} , M_r , H_c y H_{cr} , con los que se construyeron los diagramas de Day modificados por Dunlop (2002); con estos diagramas se relaciona la razón de magnetización de saturación remanente a magnetización remanente (M_{rs}/M_r) con la razón de fuerza de coerción remanente a la fuerza coercitiva (H_{cr}/H_c) para clasificar los estados de dominio magnético de las muestras. La modificación de Dunlop (2002) pone especial énfasis en materiales naturales como basaltos oceánicos, y en materiales superparamagnéticos, estado esperado para las obsidias dado su origen por enfriamiento rápido. El proceso con cada muestra es de aproximadamente 1.5 h.

7. Resultados

En el estudio sobre obsidianas se han empleado tres parámetros magnéticos para la caracterización de las muestras (McDougall et. al. 1983): 1) la susceptibilidad magnética (χ), 2) la magnetización remanente natural (NRM) y 3) la intensidad de magnetización remanente isoterma a 300 mT (IRM_{300}) y a 1T (SIRM). Estos parámetros dependen de la mineralogía magnética, incluyendo tamaño, concentración y distribución de minerales magnéticos (Vásquez, et. al., 2001). Las obsidianas se caracterizan por contener magnetita o titanomagnetita pobre en titanio, por lo que los parámetros quedan determinados por su cantidad y tamaño de grano, aunque la composición de éstas puede variar considerablemente dependiendo del flujo del cual provengan. La NRM también se caracteriza por la intensidad del campo magnético al momento del enfriamiento y los procesos posteriores a que haya sido sometida la muestra. Por lo tanto, la caracterización magnética de las obsidianas se basa en un procedimiento semicuantitativo que consiste en analizar los parámetros mencionados en gráficas en escala logarítmica.

7.1 Análisis de Datos (Durango y Sinaloa)

7.1.1 Susceptibilidad

24 muestras de obsidianas de 13 sitios diferentes en los estados de Durango y Sinaloa (tablas 11.1.1 y 11.2.1) fueron medidas en alta (*hf*) y baja (*lf*) frecuencia en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la UNAM, los resultados se resumen en la figura 7.1 (a y b).

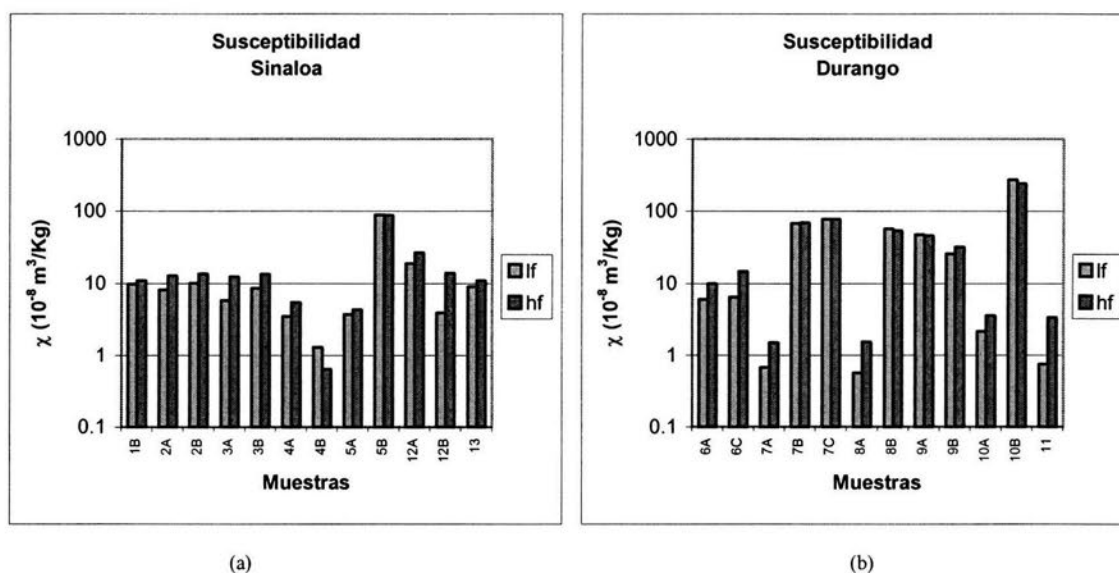


Fig. 7.1. Susceptibilidad magnética de baja y alta frecuencia de muestras de Sinaloa (a) y Durango (b).

Se pudo observar que las muestras de Sinaloa presentan un valor promedio de $\chi_{lfm} = 14.27 \pm 1.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$ (fig. 7.1a), en tanto para Durango presentan mayores valores de susceptibilidad, con un promedio de $\chi_{lfm} = 46.62 \pm 66.20 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$ (fig. 7.1b) y una mayor dispersión.

7.1.2 Diagramas

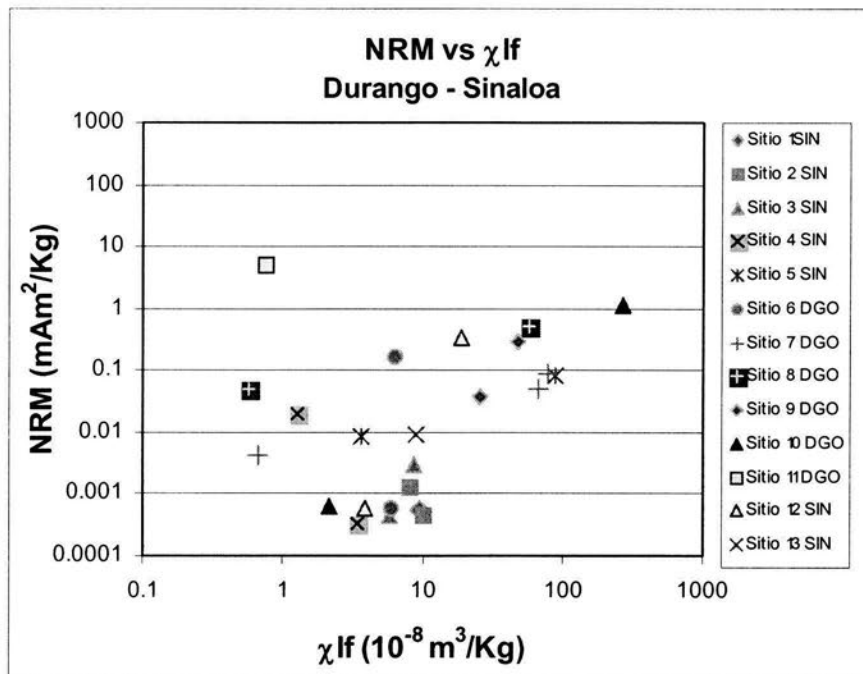


Fig. 7.2 (a) Relación entre magnetización remanente natural (NRM) y susceptibilidad a baja frecuencia, muestras de Durango y Sinaloa.

Al graficar la NRM como función de la susceptibilidad de baja frecuencia, se observa que a mayores valores de susceptibilidad los de NRM también son en general mayores (fig. 7.2 a). Esta relación no se conserva en las muestras de los sitios 2 y 4 de Sinaloa porque presentan un comportamiento opuesto, esto es que a mayor susceptibilidad presentan menor NRM.

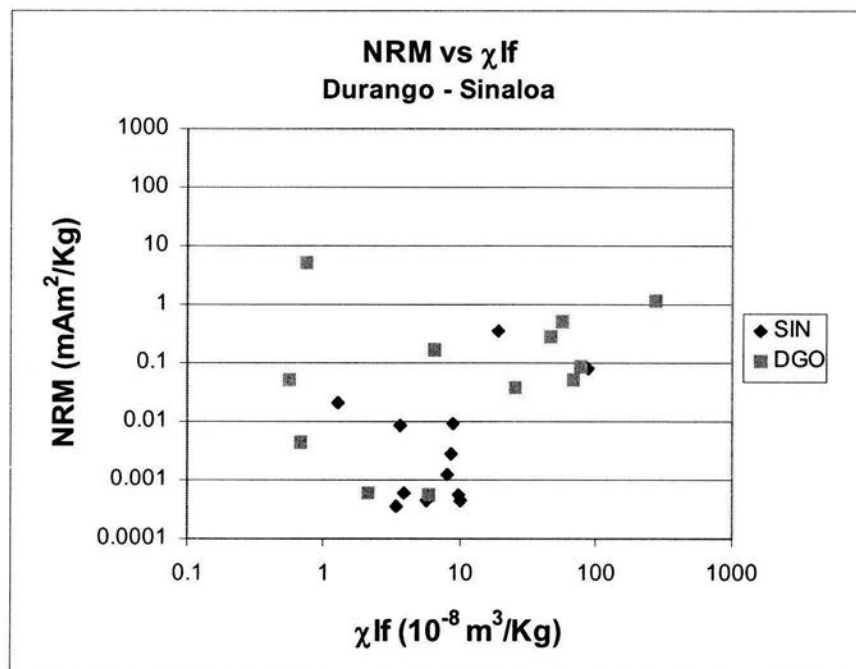


Fig. 7.2 (b) Relación entre magnetización remanente natural (NRM) y susceptibilidad a baja frecuencia, muestras de Durango y Sinaloa.

En el caso de los sitios 1, 11 y 13, sólo se contó con una muestra, por lo que no es posible establecer relaciones para cada sitio. En particular la muestra del sitio 11 de Durango presenta un comportamiento que sale de la tendencia.

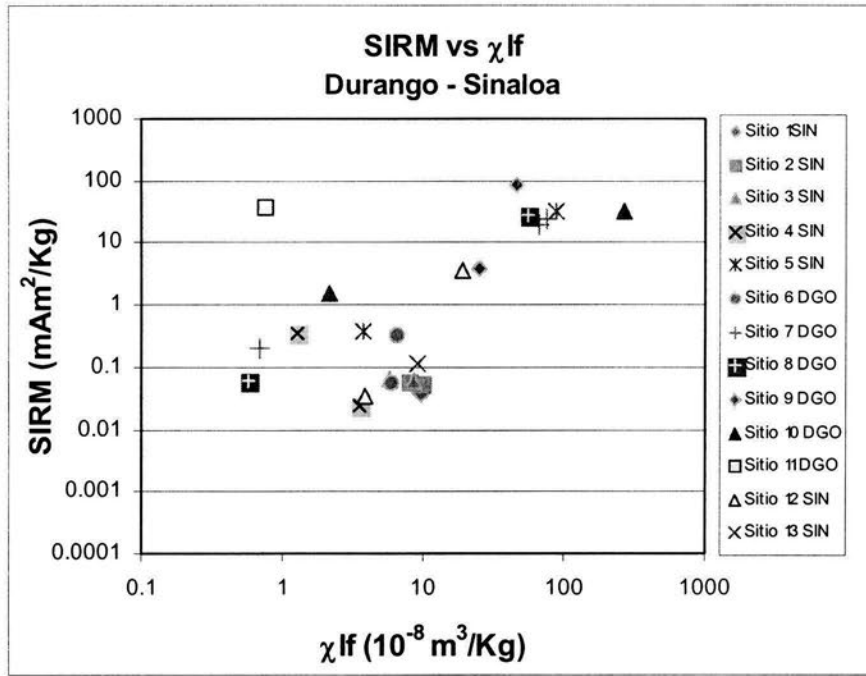


Fig.7.3. (a) Gráfica de magnetización remanente isotermal de saturación a 1T (SIRM) y susceptibilidad de baja frecuencia conjuntas.

Se puede observar en la gráfica conjunta (fig. 7.3 a) una tendencia en las muestras donde a mayor susceptibilidad, mayor magnetización de saturación. Al igual que en la relación NRM vs χ_{lf} se tiene que la muestra del sitio 11 sale de la tendencia.

En la fig. 7.3 b se pueden distinguir dos grupos, uno de mayor suscepti-

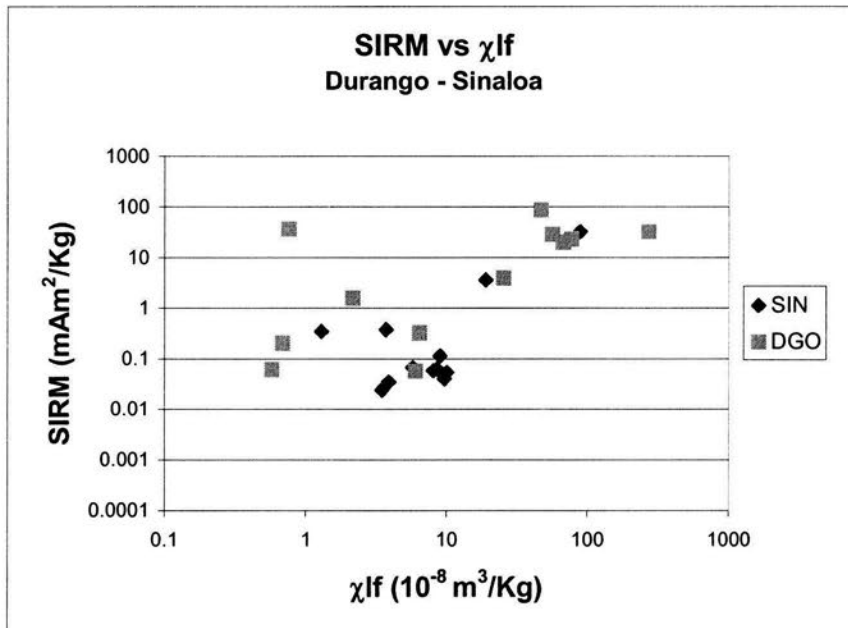


Fig.7.3. (b) Gráfica de magnetización remanente isotermal de saturación a 1T (SIRM) y susceptibilidad de baja frecuencia por estado.

bilidad $\sim 70 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$ y SIRM $\sim 30 \text{ mA m}^2/\text{Kg}$, que en su mayoría pertenecen al Estado de Durango; y un segundo grupo conformado por muestras provenientes en su mayoría del estado de Sinaloa con valores de susceptibilidad χ_{lf} menores a $10 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$ y SIRM menores a $0.1 \text{ mA m}^2/\text{Kg}$.

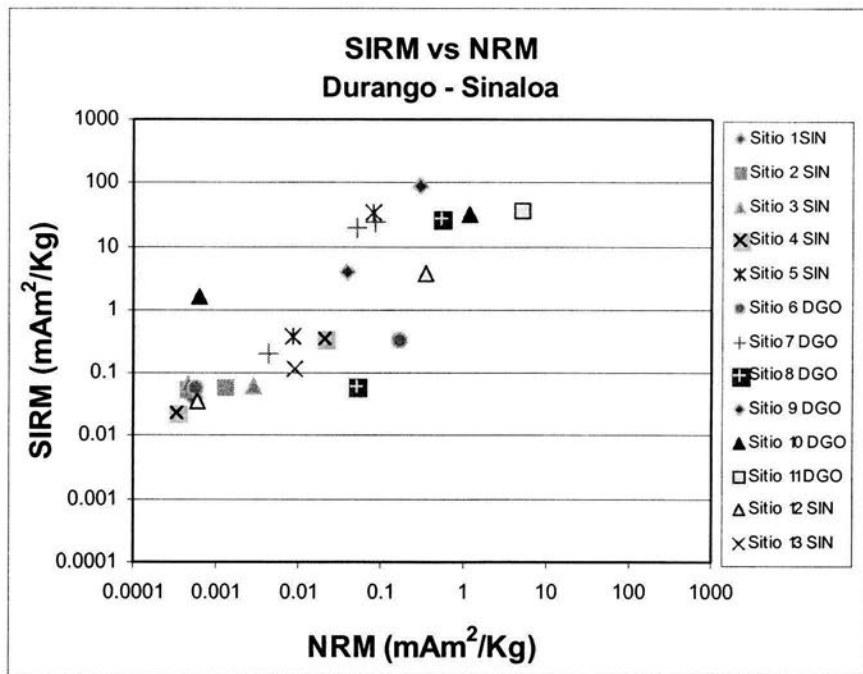


Fig.7.4. (a) Gráfica de magnetización remanente isotermal de saturación a 1T (SIRM) contra magnetización remanente natural por muestra.

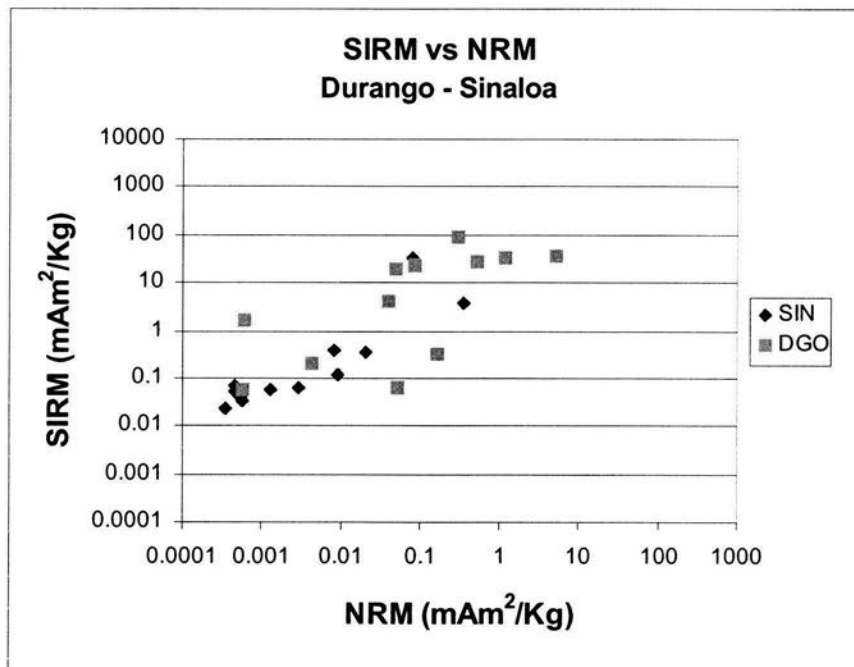


Fig. 7.4 (b) Gráfica de magnetización remanente isotermal de saturación a 1T (SIRM) contra magnetización remanente natural por sitio.

Al graficar la magnetización de saturación SIRM (1 T) contra la NRM, se observa una relación creciente en casi todas las muestras excepto para las del sitio 3, ya que no presentan variación notable en SIRM a mayores valores de NRM.

En el análisis de la relación de SIRM vs NRM clasificadas por estado, se observa que las muestras de Durango se caracterizan por presentar mayores valores de NRM y SIRM.

7.1.3 Coloración

Se clasificaron las muestras de Durango y Sinaloa de manera conjunta, en cuatro categorías diferentes de acuerdo a su coloración: negro, verde, gris y gris rojizo 8 (tablas 11.1.2 y 11.2.2). Se analizaron los mismos parámetros magnéticos relacionándolas con su coloración.

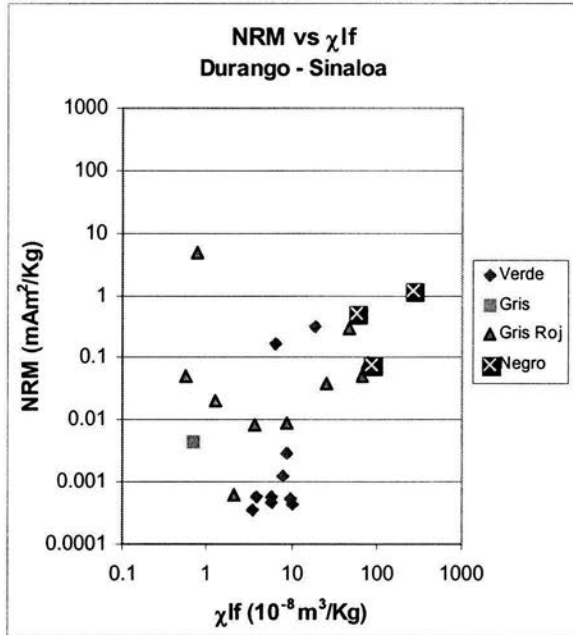


Figura 7.5 Gráfica de NRM contra susceptibilidad de baja frecuencia por colores.

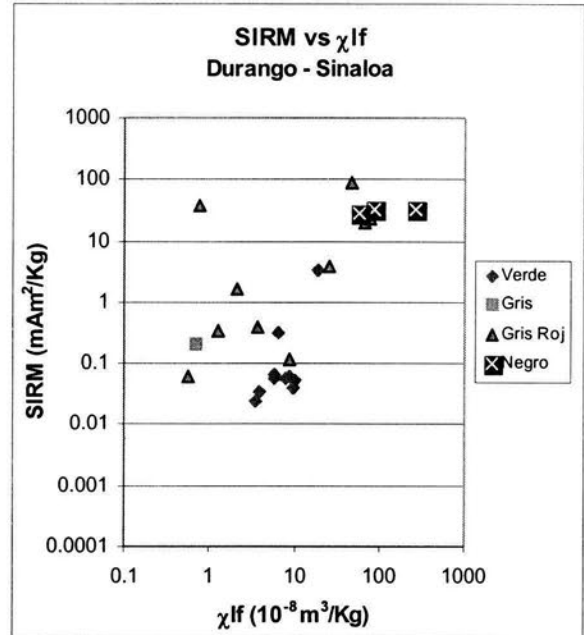


Figura 7.6 Gráfica de SIRM contra susceptibilidad de baja frecuencia por colores.

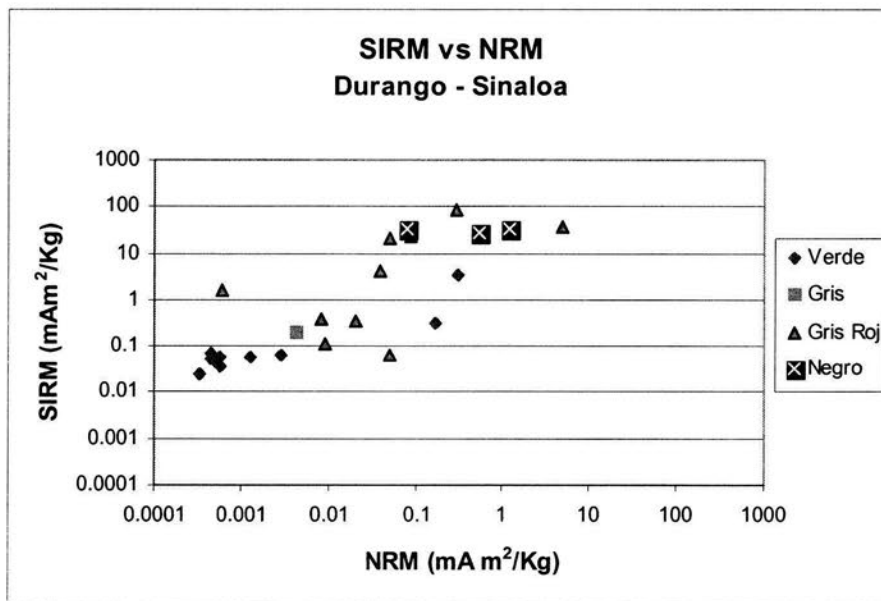


Figura 7.7 Gráfica de SIRM contra NRM por colores.

En las gráficas por colores de los diferentes parámetros se pueden observar una tendencia al agrupamiento entre las obsidias de color verde y negras, ocupando los márgenes izquierdo inferior y derecho superior respectivamente. Las diferentes tonalidades de gris (gris y gris rojizo) muestran una mayor

dispersión y se ubican en una posición intermedia entre las obsidias verdes y negras.

7.1.4 Dependencia de la susceptibilidad magnética con la temperatura

Con este análisis se busca determinar la temperatura de Curie, la cual se calcula encontrando el punto

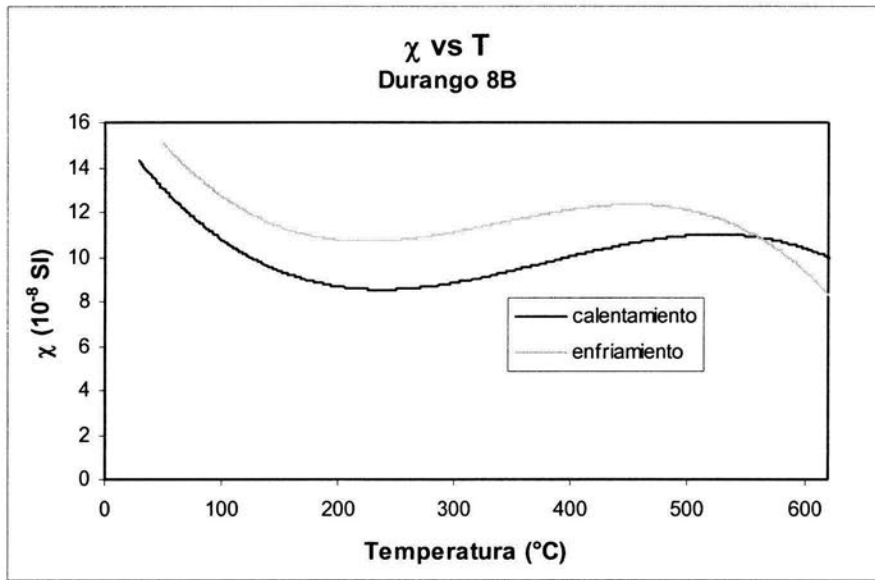


Fig. 7.8 Gráfica de cambio de susceptibilidad magnética con la temperatura.

medio entre extremos de la caída súbita durante el calentamiento. Para la muestra 8B de Durango, seleccionada por sus altos valores de NRM y χ_{lf} , se encontró que su temperatura de Curie es de 558 °C, que corresponde a minerales como titanomagnetitas pobres en titanio.

7.2 Análisis de Datos (Otumba)

7.2.1 Susceptibilidad

A 30 muestras de obsidias de Otumba, Estado de México, se les midió la susceptibilidad en alta y baja frecuencia en el laboratorio de Paleomagnetismo de la UNAM (fig. 7.10). La susceptibilidad promedio a baja frecuencia para las muestras es de $\chi_{lfm} = 47.81 \pm 36.14 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$.

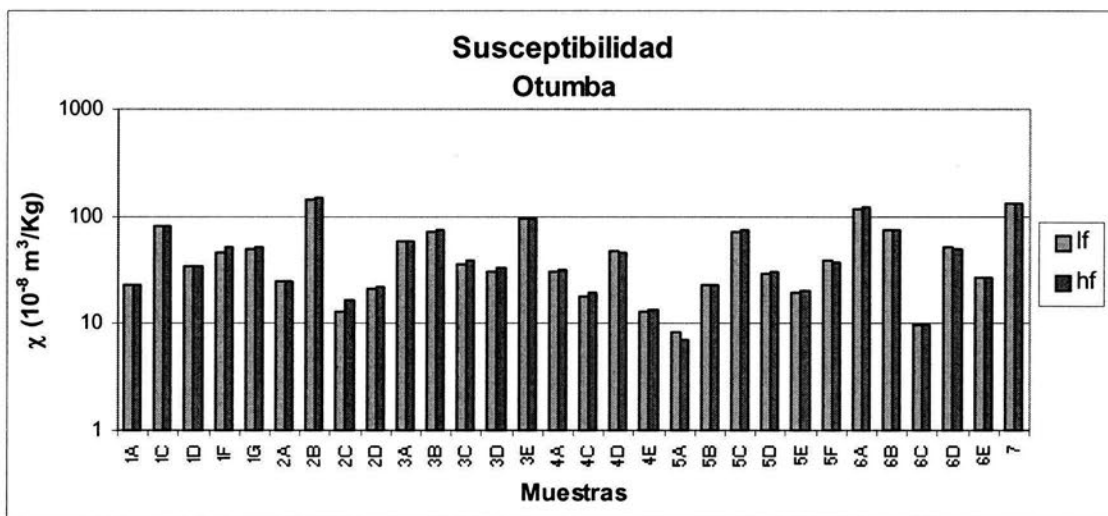


Figura 7.10 Susceptibilidad a alta y baja frecuencia de Otumba, Edo. de México.

Posteriormente se midió la magnetización remanente natural (NRM) y se graficó contra la susceptibilidad de baja frecuencia (fig. 10).

7.2.2 Diagramas

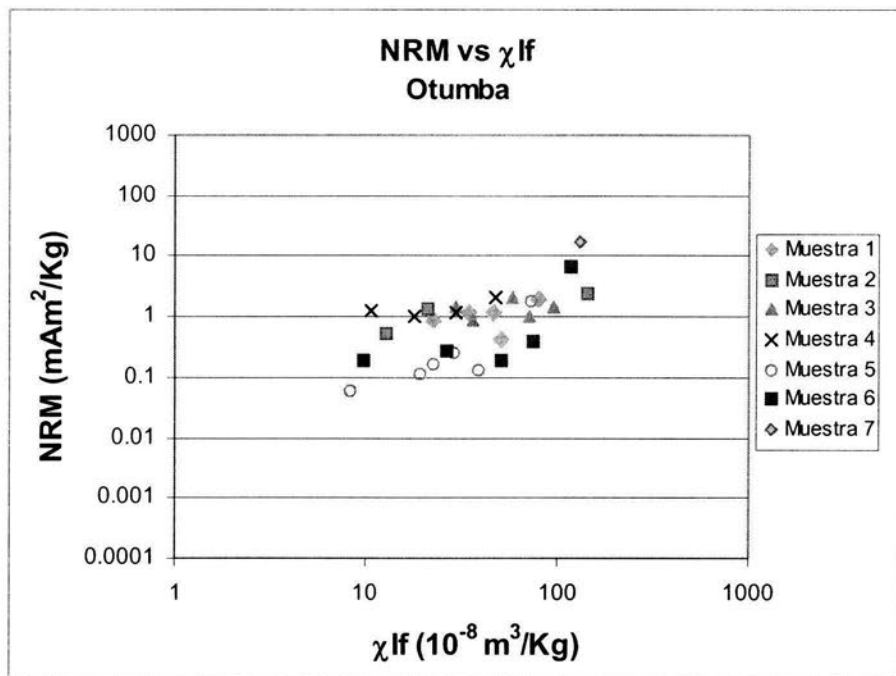


Fig.7.11 Gráfica de NRM contra susceptibilidad de baja frecuencia χ_{lf} .

de susceptibilidad.

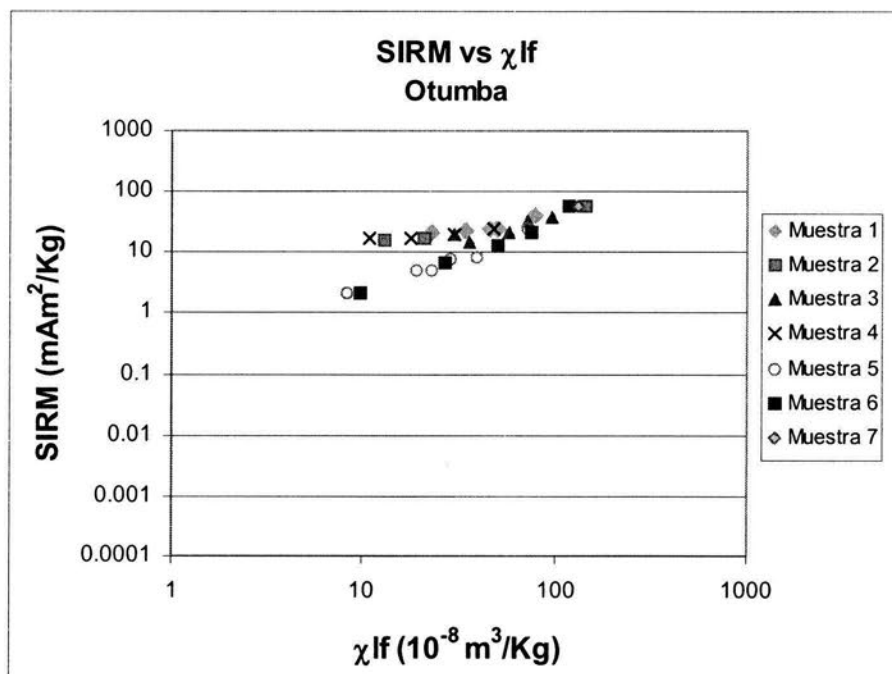


Fig.7.12 Gráfica de Magnetización remanente isotermal de saturación a 1T (SIRM) y Susceptibilidad Magnética de baja frecuencia (χ_{lf}).

En las muestras de Otumba, puede observarse que se encuentran agrupadas en una zona mejor definida en comparación con la figura 7.3 de Durango y Sinaloa, además de que prácticamente se cumple la relación esperada, a mayor susceptibilidad mayores valores de NRM, siendo la muestra 7 la que presenta los valores máximo de

Al comparar la magnetización isotérmica de saturación a 1 T (figura 7.12), se observa una tendencia de mayor magnetización de saturación a mayor susceptibilidad. Mostrando comportamientos prácticamente lineales las muestras 3, 5 y 6. Diferente comportamiento presentan las muestras 1, 2 y 4 con valores similares de $\chi_{lf} < 30 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$.

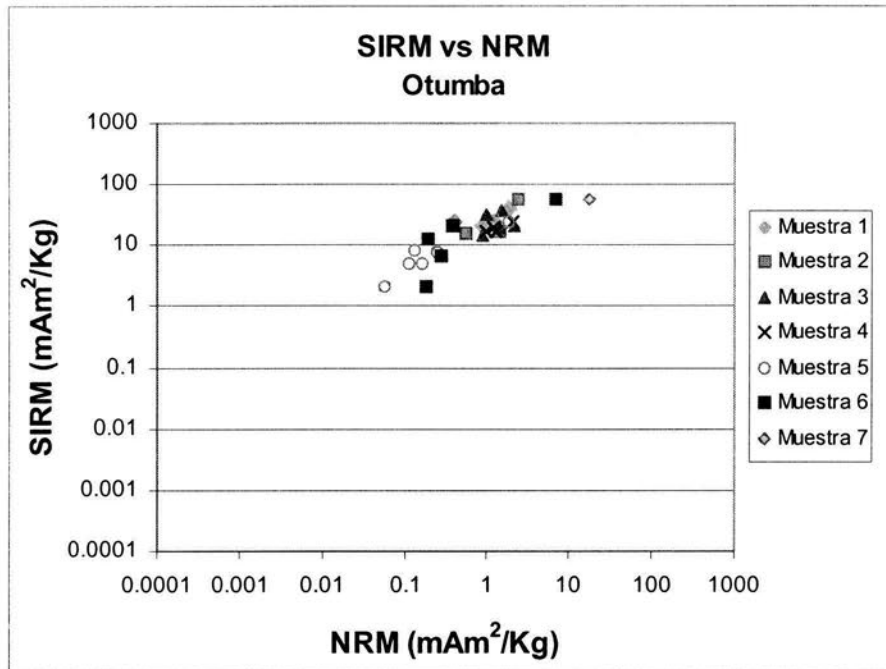


Fig. 7.13 Magnetización remanente natural NRM contra magnetización remanente isotermal SIRM.

En la figura 7.13 se observa que existe una relación creciente entre SIRM y NRM para todas las muestras de Otumba. Al comparar la tendencia observada en esta gráfica con la de la figura 7.12 entre SIRM y χ_{lf} , se observa un mayor agrupamiento entre todas las muestras.

7.2.3 Coloración

Para realizar este análisis de datos, las obsidias de Otumba se dividieron en tres diferentes grupos de acuerdo con el color dominante: rojo, gris y negro (tabla 11.3.2).

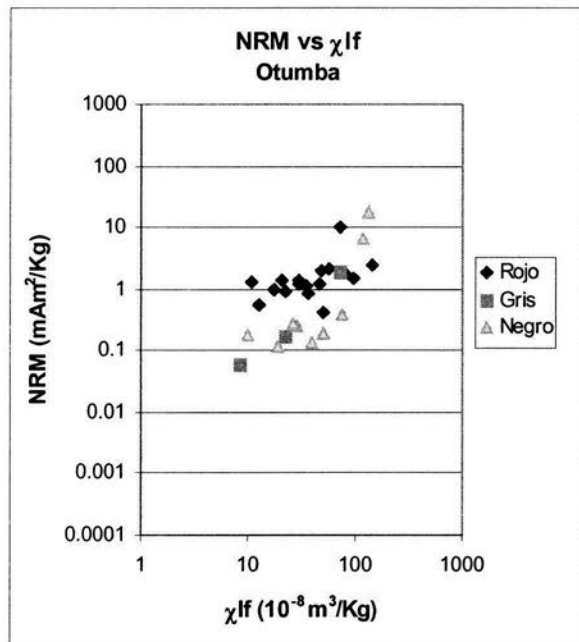


Figura 7.14 Gráfica de NRM contra susceptibilidad de baja frecuencia por colores.

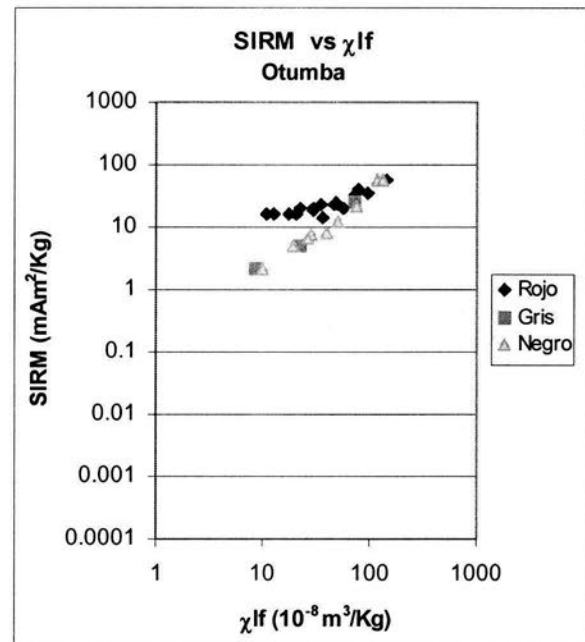


Figura 7.15 Gráfica de SIRM contra susceptibilidad de baja frecuencia por colores.

En la gráfica de NRM vs χ_{lf} (fig. 7.14) se puede observar que las obsidias rojas muestran un agrupamiento mayor que las grises y negras. También se puede observar un comportamiento creciente

y semejante en la relación de SIRM y χ_{lf} (fig. 7.15) para las muestras grises y negras, no así para las rojas con valores de valores de susceptibilidad menores a $30 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$.

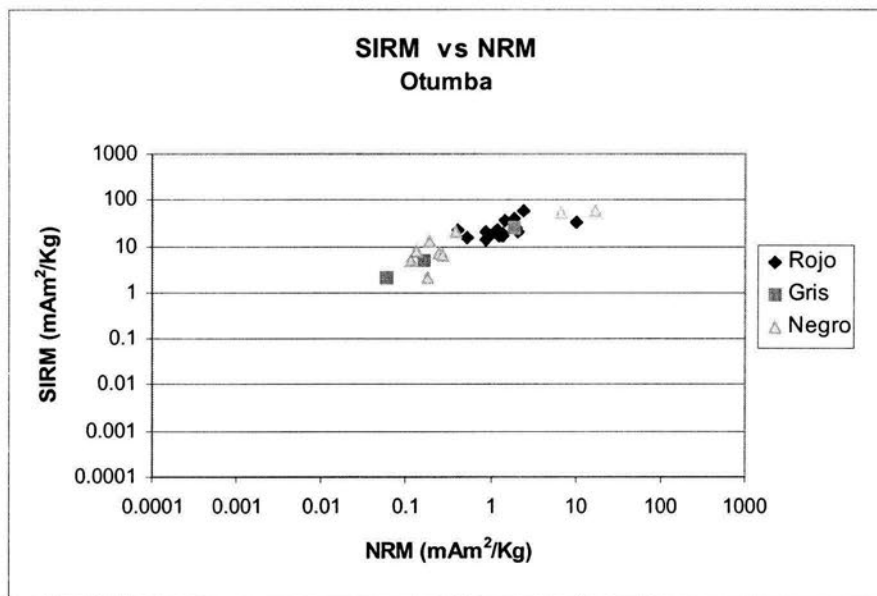


Figura 7.16 Gráfica de SIRM contra NRM por colores.

En la figura 7.16 se puede notar una tendencia creciente, a mayor NRM se tienen mayores valores de SIRM; además se observa un agrupamiento en las muestras de color rojo en la parte superior derecha del diagrama y de grises y negras en el inferior izquierdo pero con mayor dispersión.

7.2.4 Dependencia de la susceptibilidad magnética con la temperatura

Este análisis se realizó para determinar las temperaturas de Curie y se muestran en la tabla 7.1; estos valores indican la presencia de titanomagnetitas pobres en titanio.

Muestra	Temperatura de Curie (°C)
2A	546.0
2B	577.5
4D	569.0
7A	569.0
3A	561.0
4E	550.0
6A	568.5

Tabla 7.1 Temperaturas de Curie para muestras de Otumba, Edo. Méx.

En las figuras 7.17 y 7.18 se muestran dos de las gráficas más representativas de las muestras de Otumba.

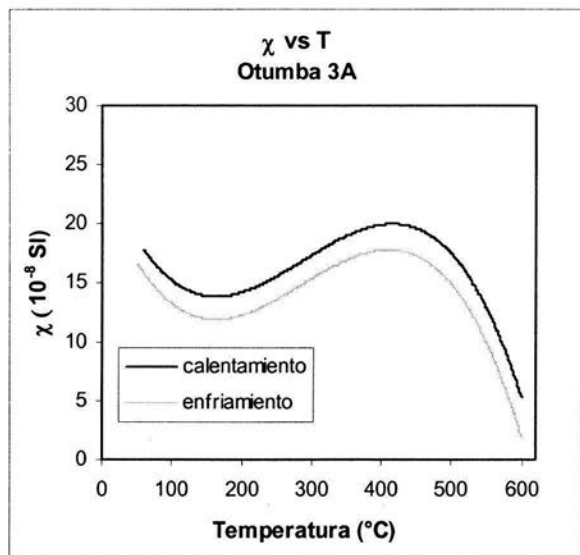


Figura 7.17 Gráfica de cambio en la susceptibilidad magnética con la temperatura.

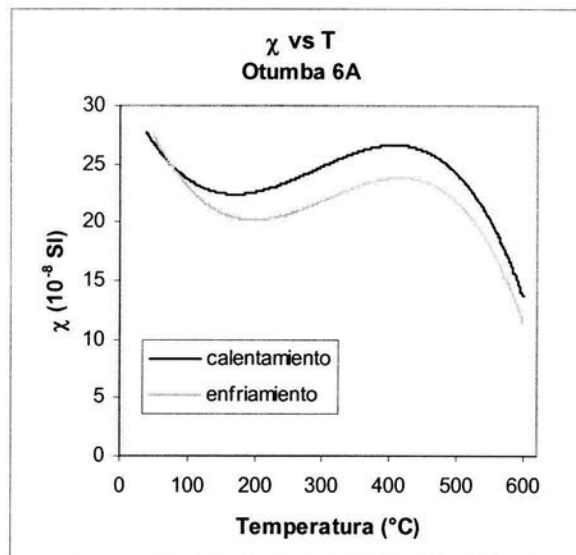


Figura 7.18. Gráfica de cambio en la susceptibilidad magnética con la temperatura.

Debido a los valores obtenidos para las temperaturas de Curie, se deduce que las muestras de Otumba tienen minerales de titanomagnetitas pobres en titanio.

7.3 Análisis conjunto

En las figuras 7.19 y 7.20 se observa como los valores para las muestras de Durango y Sinaloa

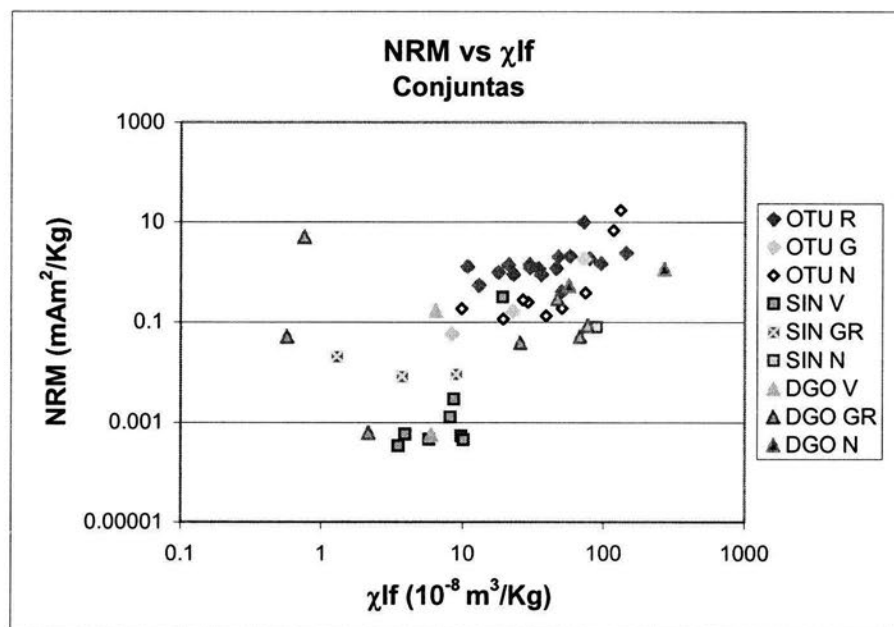


Figura 7.19 Gráfica de NRM vs χ_{lf} por color y ubicación.

presentan mayor dispersión en comparación con las muestras de Otumba. Por otro lado, las obsidias rojas (*R*) de Otumba y negras (*N*) de las tres localidades tienen mayores valores de χ_{lf} , NRM y SIRM; mientras que las muestras verdes (*V*) tienen valores agrupados en la parte

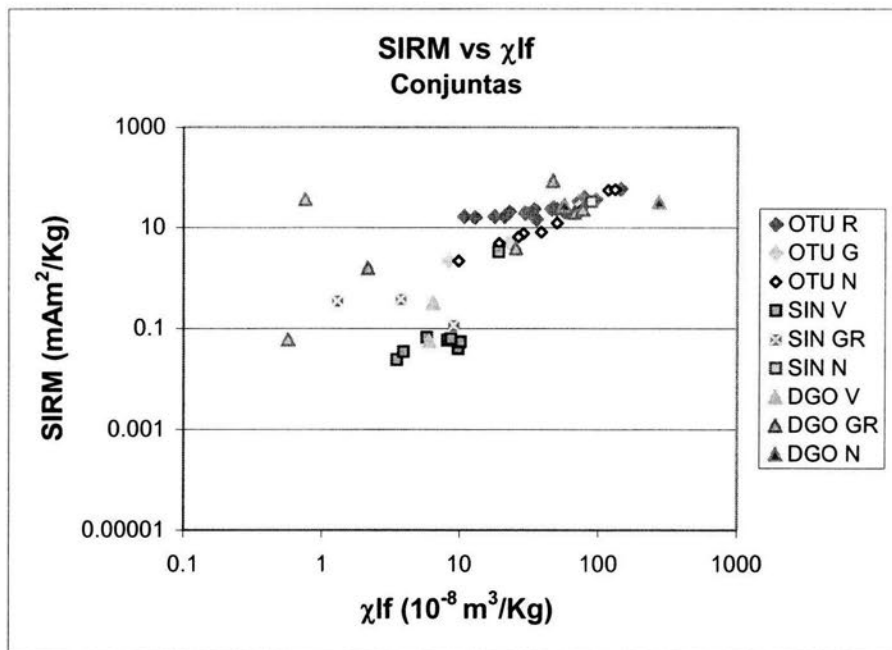


Figura 7.20 Gráfica de SIRM vs χ_{lf} por color y ubicación.

inferior de ambas gráficas con valores χ_{lf} de $\sim 8.25 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$. En el caso de las obsidias grises (G) de Durango y Sinaloa se observa mayor dispersión y no se detecta ninguna tendencia general.

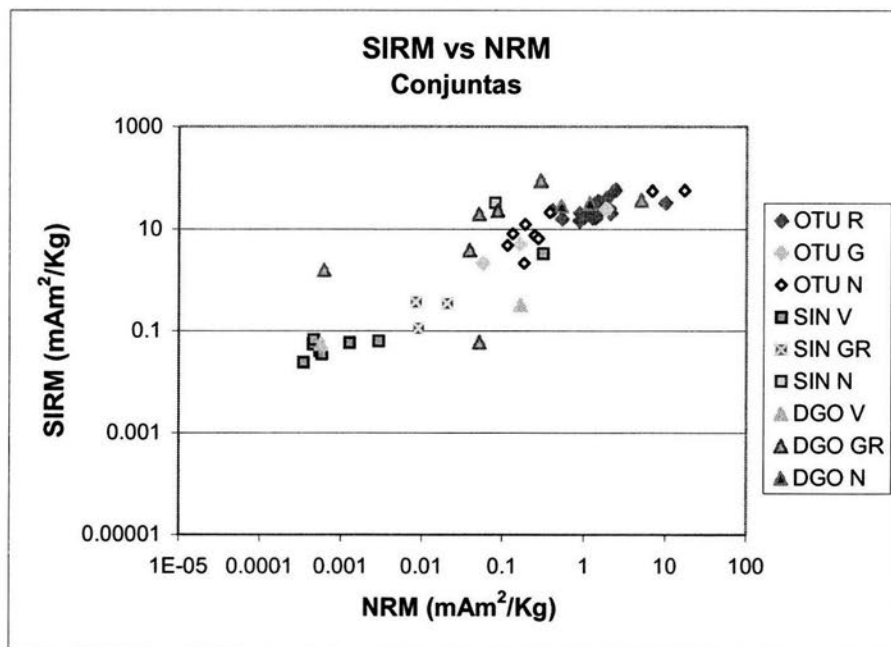
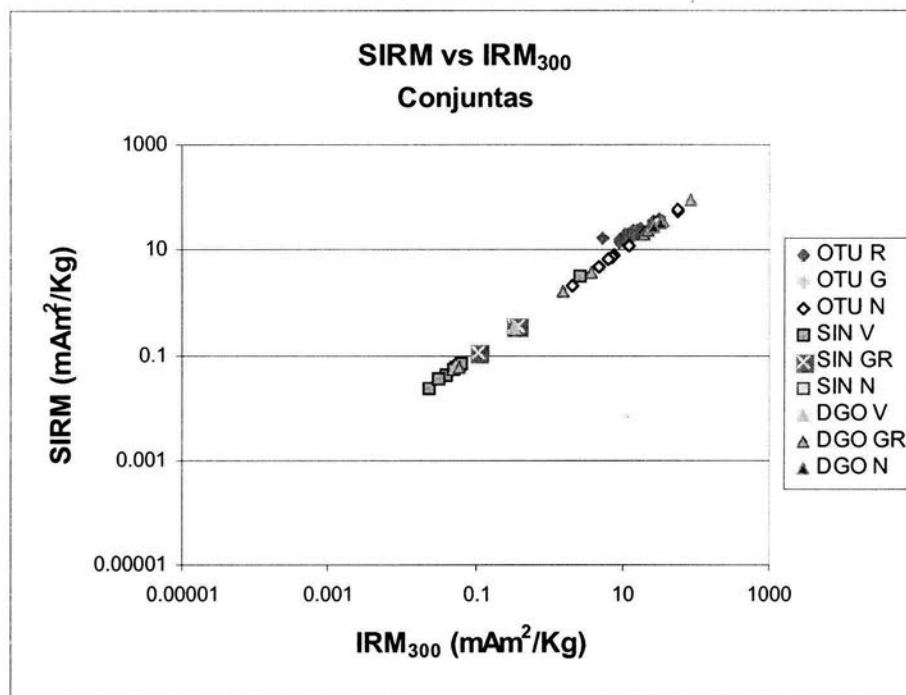


Figura 7.21 Gráfica de SIRM vs NRM por color y ubicación.

En la figura 7.21 (SIRM vs NRM) se observa una tendencia homogénea y creciente para casi todas las muestras y siendo las muestras de Durango gris rojizo (GR) las de menor dispersión.



Al graficar la magnetización de saturación SIRM a 1 T como función de la magnetización remanente isotermal a 300 mT (fig. 7.22), se observa que hay una tendencia creciente y con poca dispersión entre los valores de todas las muestras analizadas.

Figura 7.22 Gráfica de SIRM contra IRM a 300 mT por color y ubicación.

En las muestras de color rojo de Otumba se observa que los quedan fuera de la tendencia general, ya que para valores semejantes de IRM a 300 mT en las muestras negras de Otumba, las rojas toman valores de SIRM mayores, de donde se concluye que éstas no llegan a saturarse completamente en el campo de 1 T.

En la figura 7.23 se puede ver como las muestras rojas de Otumba muestran una tendencia de dominios sencillos SD y comportamiento superparamagnético SP (Dunlop, 2002), salvo la muestra 3D que se encuentra en el área de dominios SD + MD. Cabe mencionar que la muestra 3D muestra manchas de color negro en superficie y desconocemos su distribución en el interior, lo que podría explicar su comportamiento afín a las de color negro. Por otro lado, las muestras de color negro presentan una combinación de dominios SD + MD. Las muestras color gris rojizo de Sinaloa tienen dos comportamientos debido a diferencias en el contenido de titanio, siendo menor para la muestra 4B. En general la clasificación por colores a excepción del caso anterior, muestra concordancia con los datos de histéresis.

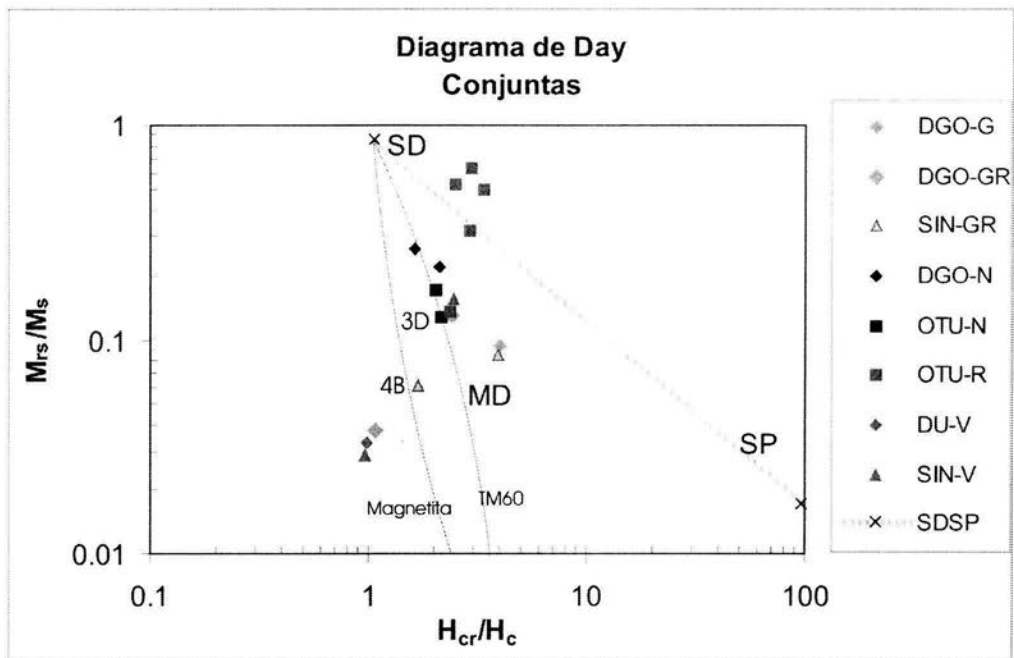


Fig. 7.23 Diagrama de Day modificado por Dunlop (Dunlop, 2002), donde se observan las muestras por localidad y color.

8. Resultados generales

Comparando ambos conjuntos de datos (Durango-Sinaloa y Otumba) se puede observar lo siguiente:

- 1) Las obsidias provenientes de Durango presentan mayor dispersión en los valores de susceptibilidad, siendo el promedio $\chi_{lfm} = 46.62 \pm 66.20 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$; mientras que las obsidias provenientes de Sinaloa tienen valores de susceptibilidad más homogéneos y su valor promedio es $\chi_{lfm} = 14.27 \pm 1.70 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$, notoriamente más bajos que en Durango. Las obsidias de Otumba tienen un comportamiento más homogéneo que el observado en las muestras del noroeste del país, y tienen como valor promedio para la susceptibilidad $\chi_{lfm} = 47.81 \pm 36.14 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$, esto es atribuible a que las muestras provienen de una sola fuente. Se observa que en promedio las muestras de Durango tienen valores más cercanos a los de Otumba.
- 2) En las muestras provenientes de las tres zonas del país, se puede observar un comportamiento semejante en los diferentes parámetros magnéticos analizados por pares, como son:
 - a) a mayor χ_{lf} mayor NRM, parámetros que reflejan el contenido de los minerales magnéticos.
 - b) a mayor χ_{lf} mayor SIRM. En este caso la tendencia es mucho más clara, debido a la mayor orientación que presentan los minerales durante el proceso de adquisición de IRM.
 - c) a mayor NRM mayor SIRM. En esta relación la tendencia es lineal prácticamente para los tres diferentes sitios, además de que la dispersión en los datos de Durango disminuye respecto a las relaciones de pares anteriores.
 - d) las muestras presentan magnetización de saturación a 300 mT, aunque algunas de las muestras de Otumba difieren ligeramente de la tendencia general.
- 3) Al agrupar las muestras por colores, se observan grupos claramente diferenciables en todos los casos.

- a) Para las tres localidades las muestras de color negro presentan mayores valores promedio de χ_{lf} , NRM y SIRM (tablas 8.1 y 8.2), excepto para la magnetización de saturación SIRM en las muestras rojas de Otumba (Tabla 8.2), lo cual se puede observar en el análisis por pares.

Coloración y procedencia	χ_{lf} ($10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$)	NRM (mAm^2/Kg)	SIRM (mAm^2/Kg)
Verde (Sinaloa)	8.57E3	4.01E-2	4.51E-1
Verde (Durango)	1.15E4	8.37E-2	1.91E-1
Gris rojizo (Sinaloa)	4.67E3	1.27E-2	2.82E-1
Gris rojizo (Durango)	3.15E4	7.89E-1	2.47E1
Negro (Sinaloa)	8.86E4	7.99E-2	3.27E1
Negro (Durango)	1.63E5	8.47E-1	3.03E1

Tabla 8.1 Valores medios de parámetros magnéticos de Durango y Sinaloa

Coloración	χ_{lf} ($10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$)	NRM (mAm^2/Kg)	SIRM (mAm^2/Kg)
Rojo	4.75E4	1.84E0	2.48E1
Gris	3.44E4	6.90E-1	1.05E1
Negro	5.52E4	2.84E0	1.95E1

Tabla 8.2 Valores medios de parámetros magnéticos de Otumba, Edo. Méx.

- b) En las obsidias color gris rojizo los valores de χ_{lf} , NRM y SIRM son mayores en las muestras de Durango que las de Sinaloa, mientras que para las obsidias de color verde se preserva esta relación exceptuando los valores de SIRM; no es así en las negras donde la diferencia sólo se presenta en susceptibilidad y NRM
- c) Las muestras grises de Otumba son similares a las de Durango y Sinaloa.
- d) Las muestras negras de Otumba aunque sus valores en orden de magnitud son similares a los de Durango y Sinaloa, siempre son menores, excepto en la NRM.
- e) Los valores de IRM a 300 mT son menores en las obsidias verdes aumentando en las grises y se observa que las obsidias negras y rojas tienen las magnetizaciones más grandes. Para las rojas se observa que toman mayores valores de SIRM pero que salen de la tendencia general, lo que puede indicar que no se saturan completamente en el campo de magnetización de 1 T.

- 4) En todas las muestras de dependencia de la susceptibilidad con la temperatura se observa temperaturas de Curie correspondientes a titanomagnetitas pobres en titanio.
- 5) El análisis de los parámetros de histéresis muestran que las diferencias observables entre las muestras son debidas el estado de dominio. Se observan claramente ensambles de dominios sencillos y superparamagnéticos (Tauxe et al., 1996; Gee & Kent, 1999; Dunlop, 2002).

9. Conclusiones

- 1) Los cambios en las propiedades magnéticas corresponden con los diferentes fuentes y colores de las obsidianas, por lo que se demuestra su utilidad para clasificarlas. Los estudios de propiedades magnéticas realizados en este trabajo muestran que las obsidianas también pueden ser útiles para otro tipo de estudios como determinación de dirección e intensidad del campo magnético.
- 2) La diferencia en las susceptibilidades a baja y alta frecuencia no reflejaron un comportamiento superparamagnético ya que no se obtuvieron valores menores de χ a alta frecuencia debido a la presencia de minerales superparamagnéticos ultrafinos. Por el contrario sí pudo observarse este comportamiento en los ciclos de histéresis, IRM y variación de la susceptibilidad con la temperatura.
- 3) Es necesario realizar un mayor número de estudios como el del comportamiento magnético de las obsidianas a bajas temperaturas (cerca del cero absoluto), para poder hacer una caracterización más completa del superparamagnetismo de las muestras.
- 4) En el caso de las muestras de Durango y Sinaloa es necesario obtener un mayor número de muestras además mayor información geológica de las mismas, para poder establecer una caracterización e identificación de las posibles fuentes de emisión.

10. Bibliografía

1. Butler, R. F. 1992. *Paleomagnetism: magnetic domains to geological terranes*. Blackwell, USA.
2. Cas, R. A. F. & Wright, J. V. 1993. *Volcanic successions: modern and ancient*. Chapman & Hall. London.
3. Dunlop, D.J. 2002. *Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 2. Application to data for rocks, sediments and soils*. JGR, vol. 107, No.B3.
4. Gee, J. & Kent, D.V. 1999. *Calibration of magnetic granulometric trends in oceanic basalts*. Earth and Planet. Sci. Lett. 170, pp. 377-390.
5. McDougall, J. M., Tarling, D. H. & Warren, S. E. 1983. *The magnetic sourcing of obsidian samples from Mediterranean and near Eastern sources*. Journal of Archaeological Science, 10, pp. 441-452.
6. McElhinny, M. W. and McFadden, P. L. 2000. *Paleomagnetism. Continents and Oceans*. Academic Press. USA.
7. Munsell Soil Color Charts, 2000. Baltimore, Maryland, Macbeth Division of Kollmorgen Corporation. USA.
8. Murillo, G., Policroniades, R., Méndez, B., Andrade, E., Pineda, J. C., Zavala, E. P. & Torres, J. L. 1998. *Analysis of Mexican obsidians by IBA techniques*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B, 136-138, pp. 888-892.
9. Pastrana, A. 1988. *La localización e identificación de yacimientos de obsidiana y otras materias primas*. La Antropología en México. Panorama histórico. INAH.
10. Reitz, J. R., Milford F. J., Christy, R. W. 1986. *Fundamentos de la teoría electromagnética*. Addison-Wesley Iberoamericana. EUA.
11. Riciputi, L. R., Elam, J. M., Anovitz, L. M. & Cole, D. R. 2002. *Obsidian diffusion dating by secondary ion mass spectrometry: A test using results from Mouud 65. Chalco, Mexico*. Journal of Archaeological Science, 29, pp. 1055-1075.
12. Scorzelli, R. B., Petrick, S., Rossi, A. M., Poupeau, G. & Bigazzi, G. 2001. *Obsidian archaeological artefacts provenance studies in the Western Mediterranean basin: an approach by Mössbauer spectroscopy and electron paramagnetic resonance*. Earth and Planetary Sciences, 332, pp. 769-776.
13. Stewart, D. B. 1979. *The formation of siliceous potassic glassy rocks*. The evolution of the igneous rocks. 50th anniversary perspectives. Princeton University Press, USA.
14. Stewart, J. J., Cernicchiaro, G., Scorzelli, R. B., Poupeau, G., Acquafredda, P. & De Francesco, A. 2003. *Magnetic properties and ⁵⁷Fe Mössbauer spectroscopy of Mediterranean prehistoric obsidians for provenance studies*. Journal of Non-Crystalline Solids, 323, pp. 188-192.
15. Tarling, D. H. 1983. *Paleomagnetism. Principles and applications in geology, geophysics and archaeology*. Chapman and Hall. London.

16. Tauxe, L., Mullender, T.A.T. and Pick, T. 1996. Potbellies, wasp-waists, and superparamagnetism in magnetic hysteresis. *JGR*, vol. 101, No. B1, pp. 571-583.
17. Tenorio, D., Cabral, A., Jiménez-Reyes, M. y Bulbulian, S. 1998. *Differences in coloured obsidians from Sierra de Pachuca*, México. *Journal of Archaeological Science*, 25, pp. 229-234.
18. Urrutia-Fucugauchi, J. 1999. *Preliminary results of a rock-magnetic study of obsidians from central México*. *Geofísica Internacional*, 38, pp. 83-94.
19. Vásquez, C. A., Nami, H. G. & Rapalini, A. E. 2001. *Magnetic Sourcing of obsidians in South America: some successes and doubts*. *J. Archaeol. Sci.*, 28, pp. 613-618.
20. Whitten, D. G. A. y Brooks, J. R. V. 1980. *Diccionario de Geología*. Alianza Editorial. España.
21. Xu, W., Van der Voo, R., Peacor, D. & Beaubouef, R. 1997. Alteration and dissolution of fine-grained magnetite and its effects on magnetization of the ocean floor. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 151, pp. 279-288.

11. Apéndice

11.1 Sinaloa

	H (mT)	Muestra											
		1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B	12A	12b	13
NRM (mAm ² /Kg)	0	5.41E-04	1.27E-03	4.49E-04	4.57E-04	2.89E-03	3.42E-04	2.06E-02	8.39E-03	7.99E-02	3.14E-01	5.79E-04	9.07E-03
	10	1.79E-03	4.56E-03	1.84E-03	2.18E-03	2.00E-03	9.11E-03	2.55E-02	2.28E-02	1.64E-01	2.94E-01	7.34E-04	0.00E+00
	50	2.25E-02	2.63E-02	2.39E-02	1.89E-02	2.06E-03	9.51E-03	1.25E-01	1.99E-01	1.05E+01	1.32E+00	1.38E-02	3.99E-02
	100	3.28E-02	4.32E-02	4.16E-02	4.88E-02	4.86E-02	1.75E-02	2.40E-01	2.88E-01	2.23E+01	4.46E-01	2.45E-02	7.05E-02
	200	3.78E-02	5.20E-02	5.13E-02	6.10E-02	5.97E-02	2.22E-02	3.15E-01	3.49E-01	2.99E+01	2.12E+00	3.06E-02	1.03E-01
	250	3.88E-02	5.39E-02	5.17E-02	6.44E-02	6.09E-02	2.30E-02	3.29E-01	3.62E-01	3.12E+01	2.11E+00	3.17E-02	1.07E-01
IRM (mAm ² /Kg)	300	3.91E-02	5.53E-02	5.23E-02	6.49E-02	6.19E-02	2.34E-02	3.36E-01	3.67E-01	3.18E+01	2.70E+00	3.18E-02	1.10E-01
	500	3.93E-02	5.52E-02	5.23E-02	6.57E-02	6.24E-02	2.38E-02	3.46E-01	3.75E-01	3.24E+01	2.69E+00	3.26E-02	1.12E-01
SIRM (mAm ² /Kg)	1000	4.01E-02	5.83E-02	5.39E-02	6.64E-02	6.24E-02	2.41E-02	3.51E-01	3.79E-01	3.27E+01	3.27E+00	3.47E-02	1.15E-01
	0	4.01E-02	5.83E-02	5.39E-02	6.64E-02	6.24E-02	2.41E-02	3.51E-01	3.79E-01	3.27E+01	3.27E+00	3.47E-02	1.15E-01
	-10	3.04E-02	2.80E-02	4.05E-02	4.90E-02	4.63E-02	1.95E-02	2.98E-01	2.67E-01	2.76E+01	3.00E+00	2.38E-02	8.89E-02
	-50	-1.21E-02	-1.65E-02	-8.70E-03	1.26E-02	1.10E-02	1.12E-03	3.12E-02	-8.32E-02	-3.05E+00	1.35E+00	-6.67E-03	-8.03E-02
	-100	-2.95E-02	-4.13E-02	-3.64E-02	-4.48E-02	-4.02E-02	-1.46E-02	-1.82E-01	-2.39E-01	-2.14E+01	4.57E-01	-2.28E-02	-6.17E-02
	-200	-3.66E-02	-5.30E-02	-4.94E-02	-6.20E-02	-5.86E-02	-2.19E-02	-3.00E-01	-3.33E-01	-3.04E+01	-2.14E+00	-3.08E-02	-9.98E-02
	-250	-3.75E-02	-5.52E-02	-5.17E-02	-6.41E-02	-6.06E-02	-2.31E-02	-3.18E-01	-3.51E-01	-3.17E+01	-2.50E+00	-3.20E-02	-1.05E-01
	-300	-3.82E-02	-5.58E-02	-5.32E-02	-6.42E-02	-6.11E-02	-2.36E-02	-3.28E-01	-3.57E-01	-3.23E+01	-2.75E+00	-3.23E-02	-1.10E-01
	-500	-3.91E-02	-5.71E-02	-5.36E-02	-6.54E-02	-6.08E-02	-2.40E-02	-3.41E-01	-3.72E-01	-3.28E+01	-3.10E+00	-3.37E-02	-1.13E-01
	-1000	-4.00E-02	-5.60E-02	-5.38E-02	-6.72E-02	-6.23E-02	-2.44E-02	-3.48E-01	-3.77E-01	-3.30E+01	-3.24E+00	-3.39E-02	-1.16E-01
	χ_{lf} (10 ⁻⁸ m ³ /Kg)		9.69E+00	8.10E+00	1.01E+01	5.75E+00	8.60E+00	3.49E+00	1.29E+00	3.72E+00	8.86E+01	1.90E+01	3.90E+00
χ_{hf} (10 ⁻⁸ m ³ /Kg)		1.09E+01	1.28E+01	1.35E+01	1.24E+01	1.34E+01	5.41E+00	6.46E-01	4.32E+00	8.75E+01	2.66E+01	1.39E+01	1.09E+01

Tabla 11.1.1 Magnetizaciones a diferentes campos aplicados H y susceptibilidades.

Muestra	Color Munsell	Descripción
1B	5 Y 4/3	Olivo
2A	5 Y 4/3	Olivo
2B	5 Y 5/6	Olivo
3A	5 Y 4/2	Gris olivo
3B	5 Y 4/2	Gris olivo
4A	5 Y 4/2	Gris olivo
4B	2.5 YR 4/1	Rojo débil
5A	2.5 YR 4/1	Rojo débil
5B	5 Y 2.5/1	Negra
12A	5 Y 4/1	Gris oscuro
12B	5 Y 5/4	Olivo
13	2.5 YR 4/1	Rojo débil

Tabla 11.1.2 Colores en muestras de Sinaloa.

Muestra	Mr/Ms	Hcr/Hc
3B	0.029	0.955782313
4B	0.085	3.929384966
12A	0.155	2.440860215
13	0.061	1.702702703

Tabla 11.1.3 Cocientes de magnetización y coercitividad del Micromag.

11.2 Durango

		Muestra											
	H (mT)	5A	5B	5C	5D	5E	5F	6A	6B	6C	6D	6E	7
NRM (mAm ² /Kg)	0	5.75E-02	1.64E-01	1.85E+00	2.49E-01	1.15E-01	1.34E-01	6.82E+00	3.81E-01	1.84E-01	1.88E-01	2.78E-01	1.72E+01
	10	3.24E-01	2.66E-01	1.67E+00	4.52E-01	7.59E-02	3.79E-01	7.65E+00	6.22E-01	1.85E-01	3.69E-01	3.30E-01	1.50E+01
	50	1.12E+00	2.19E+00	1.09E+01	3.30E+00	1.61E+00	3.47E+00	2.58E+01	1.18E+01	7.80E-01	5.15E+00	2.01E+00	2.46E+01
	100	1.62E+00	3.70E+00	1.86E+01	5.41E+00	3.09E+00	5.75E+00	4.46E+01	1.73E+01	1.38E+00	8.86E+00	4.10E+00	4.63E+01
	200	1.94E+00	4.79E+00	2.28E+01	6.83E+00	4.25E+00	7.22E+00	5.30E+01	2.01E+01	1.88E+00	1.12E+01	5.72E+00	5.47E+01
	250	2.02E+00	5.04E+00	2.36E+01	7.11E+00	4.47E+00	7.57E+00	5.42E+01	2.06E+01	1.99E+00	1.17E+01	6.09E+00	5.51E+01
	300	2.07E+00	5.16E+00	2.39E+01	7.24E+00	4.60E+00	7.77E+00	5.44E+01	2.08E+01	2.05E+00	1.20E+01	6.27E+00	5.59E+01
IRM (mAm ² /Kg)	500	2.13E+00	5.34E+00	2.43E+01	7.45E+00	4.75E+00	7.98E+00	5.49E+01	2.10E+01	2.13E+00	1.22E+01	6.45E+00	5.70E+01
	1000	2.18E+00	5.01E+00	2.44E+01	7.56E+00	4.82E+00	8.10E+00	5.54E+01	2.11E+01	2.17E+00	1.23E+01	6.54E+00	5.73E+01
SIRM (mAm ² /Kg)	0	2.18E+00	5.01E+00	2.44E+01	7.56E+00	4.82E+00	8.09E+00	5.54E+01	2.10E+01	2.17E+00	1.23E+01	6.54E+00	5.73E+01
	-10	1.64E+00	4.40E+00	2.09E+01	6.19E+00	4.13E+00	6.48E+00	4.99E+01	1.56E+01	1.79E+00	1.00E+01	5.66E+00	4.77E+01
	-50	-4.36E-01	1.18E-01	-6.76E-01	1.87E-01	5.09E-01	-4.37E-01	4.51E+00	1.55E+01	8.52E-02	1.07E+00	7.21E-01	-5.87E+00
	-100	-1.28E+00	-2.68E+00	-1.49E+01	-3.99E+00	-	-4.61E+00	-3.72E+01	-6.45E+00	-1.02E+00	-7.10E+00	-2.96E+00	-3.96E+01
	-200	-1.81E+00	-4.47E+00	-2.21E+01	-6.30E+00	-2.11E+00	-7.07E+00	-5.29E+01	-1.58E+01	-1.81E+00	-1.09E+01	-5.49E+00	-5.22E+01
	-250	-1.93E+00	-4.84E+00	-2.31E+01	-6.72E+00	-4.24E+00	-7.54E+00	-5.41E+01	-2.03E+01	-1.97E+00	-1.16E+01	-5.97E+00	-5.38E+01
	-300	-2.00E+00	-5.03E+00	-2.37E+01	-6.94E+00	-4.46E+00	-7.75E+00	-5.49E+01	-2.06E+01	-2.04E+00	-1.19E+01	-6.19E+00	-5.42E+01
	-500	-2.09E+00	-5.25E+00	-2.41E+01	-7.26E+00	-4.66E+00	-8.01E+00	-5.53E+01	-2.09E+01	-2.13E+00	-1.22E+01	-6.45E+00	-5.58E+01
	-1000	-2.15E+00	-5.34E+00	-2.45E+01	-7.34E+00	-4.76E+00	-8.12E+00	-5.55E+01	-2.10E+01	-2.18E+00	-1.23E+01	-6.55E+00	-5.76E+01
	χ_{lf} (10 ⁻⁸ m ³ /Kg)		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
χ_{hf} (10 ⁻⁸ m ³ /Kg)		6.96E+00	2.31E+01	7.57E+01	3.04E+01	1.99E+01	3.75E+01	1.19E+02	7.44E+01	9.81E+00	5.00E+01	2.68E+01	1.30E+02

Tabla 11.2.1 Magnetizaciones a diferentes campos aplicados H y susceptibilidades.

Muestra	Color Munsell	Descripción
6A	5 Y 5/2	Gris olivo
6B	5 Y4/2	Gris olivo
7A	10 YR 4/1	Gris oscuro
7B	2.5 YR 5/1	Gris rojizo
7C	2.5 YR 5/1	Gris rojizo
8A	2.5 YR 6/1	Gris rojizo
8B	GLE Y1 2.5 N	Negro
9A	2.5 YR 5/1	Gris rojizo
9B	2.5 YR 6/1	Gris rojizo
10A	2.5 YR 6/1	Gris rojizo
10B	GLE Y1 2.5 N	Negro
11	2.5 YR 4/1	Gris rojizo

Tabla 11.2.2 Colores en muestras de Durango

Muestra	Mr/Ms	Hcr/Hc
6A	0.033	0.982142857
7A	0.093	4.030131827
8B	0.219	2.116129032
9B	0.13	2.418439716
10B	0.267	1.617486339
11	0.038	1.08115942

Tabla 11.2.3 Cocientes de magnetización y coercitividad del Micromag

11.3 Otumba

		Muestras							
	H (mT)	1A	1C	1D	1FB	1G	2B	2C	2D
NRM (mAm ² /Kg)	0	8.86E-01	1.88E+00	1.17E+00	1.19E+00	4.11E-01	2.40E+00	5.38E-01	1.38E+00
	10	1.23E+00	2.86E+00	1.08E+00	1.55E+00	4.69E-01	2.39E+00	5.66E-01	9.11E-01
	50	5.44E+00	1.56E+01	5.19E+00	6.65E+00	8.45E+00	2.82E+01	4.08E+00	3.26E+00
	100	8.07E+00	2.42E+01	9.39E+00	1.13E+01	1.20E+01	4.52E+01	6.42E+00	6.35E+00
	200	9.92E+00	2.92E+01	1.24E+01	1.45E+01	1.40E+01	5.24E+01	8.14E+00	9.12E+00
	250	1.05E+01	3.06E+01	1.31E+01	1.53E+01	1.46E+01	5.36E+01	8.62E+00	9.89E+00
IRM (mAm ² /Kg)	300	1.09E+01	3.11E+01	1.36E+01	1.57E+01	1.51E+01	5.45E+01	8.95E+00	1.04E+01
	500	1.30E+01	3.38E+01	1.55E+01	1.74E+01	1.69E+01	5.59E+01	1.02E+01	1.19E+01
SIRM (mAm ² /Kg)	1000	2.04E+01	4.03E+01	2.29E+01	2.33E+01	2.34E+01	5.82E+01	1.58E+01	1.64E+01
	0	2.04E+01	4.03E+01	2.29E+01	2.33E+01	2.34E+01	5.82E+01	1.58E+01	1.64E+01
	-10	1.87E+01	3.36E+01	2.11E+01	2.10E+01	1.93E+01	4.84E+03	1.47E+01	1.51E+01
	-50	1.23E+01	-5.90E+00	1.31E+01	1.12E+01	5.14E+00	5.54E+01	1.04E+01	1.05E+01
	-100	7.93E+00	-1.14E+01	6.07E+00	-2.73E+00	-3.44E-01	-3.54E+01	-5.93E+00	5.44E+00
	-200	-3.62E+00	-1.89E+01	-2.41E+00	-4.37E+00	-3.41E+00	-4.66E+01	-1.33E+00	-6.29E-01
	-250	-2.29E+00	-2.06E+01	-3.37E+00	-5.70E+00	-4.55E+00	-4.82E+01	-5.86E-01	-2.37E+00
	-300	-1.23E+00	-2.18E+01	-4.31E+00	-6.88E+00	-5.49E+00	-4.98E+01	-1.12E+00	-3.64E+00
	-500	-3.62E+00	-2.67E+01	-8.55E+00	-1.04E+01	-9.49E+00	-5.31E+01	-3.88E+00	-6.99E+00
	-1000	-1.81E+00	-3.88E+01	-2.22E+01	-2.17E+01	-2.20E+01	-5.78E+01	-1.43E+01	-1.52E+01
	χ_{lf} (10 ⁻⁸ m ³ /Kg)		1.33E-02	7.90E+01	3.44E+01	4.60E+01	5.04E+01	1.44E+02	1.29E+01
χ_{hf} (10 ⁻⁸ m ³ /Kg)		2.33E+01	8.07E+01	3.38E+01	5.05E+01	5.10E+01	1.46E+02	1.67E+01	2.23E+01

Tabla 11.3.1 Magnetizaciones a diferentes campos aplicados H y susceptibilidades.

Continuación de tabla 11.3.1

		Muestra								
	H (mT)	3A	3B	3C	3D	3E	4A	4C	4D	4E
NRM (mAm ² /Kg)	0	2.10E+00	1.00E+01	8.79E-01	1.40E+00	1.48E+00	1.21E+00	9.85E-01	2.03E+00	1.27E+00
	10	2.28E+00	2.96E+00	7.17E-01	1.61E+00	1.54E+00	1.44E+00	9.23E-01	2.13E+00	1.29E+00
	50	8.03E+00	1.46E+01	3.74E+00	4.82E+00	1.11E+01	6.20E+00	1.89E+00	8.33E+00	4.83E+00
	100	1.30E+01	2.17E+01	6.36E+00	7.84E+00	1.99E+01	1.10E+01	3.07E+00	1.26E+01	8.40E+00
	200	1.50E+01	2.44E+01	8.06E+00	1.02E+01	2.45E+01	1.41E+01	4.35E+00	1.55E+01	1.14E+01
IRM (mAm ² /Kg)	250	1.53E+01	2.52E+01	8.50E+00	1.07E+01	2.56E+01	1.48E+01	4.79E+00	1.63E+01	1.21E+01
	300	1.56E+01	2.56E+01	8.86E+00	1.11E+01	2.62E+01	1.54E+01	5.18E+00	1.69E+01	1.26E+01
SIRM (mAm ² /Kg)	500	1.71E+01	2.74E+01	1.01E+01	1.28E+01	2.93E+01	1.68E+01	6.82E+00	1.93E+01	1.39E+01
	1000	2.03E+01	3.28E+01	1.45E+01	1.90E+01	3.60E+01	1.98E+01	1.66E+01	2.48E+01	1.66E+01
	0	2.03E+01	3.28E+01	1.45E+01	1.90E+01	3.60E+01	1.98E+01	1.66E+01	2.48E+01	1.66E+01
	-10	1.74E+01	2.74E+01	1.26E+01	1.70E+01	-	1.84E+01	1.57E+01	2.18E+01	1.58E+01
	-50	4.03E+00	-3.17E+00	5.75E+00	1.08E+01	3.04E+01	9.84E+00	1.32E+01	7.99E+00	1.16E+01
	-100	-5.45E+00	-9.89E+00	1.78E+00	1.82E+01	8.41E+00	-1.70E+00	1.17E+01	-1.32E+00	5.17E+00
	-200	-1.14E+01	-1.55E+01	-1.23E+00	-7.24E-01	-1.01E+01	-5.56E+00	9.27E+00	-5.60E+00	2.48E+00
	-250	-1.00E+01	-1.68E+01	-2.03E+00	-1.21E+00	-1.52E+01	-7.39E+00	7.96E+00	-7.29E+00	-4.44E+00
	-300	-1.06E+01	-1.77E+01	-2.67E+00	-2.08E+00	-1.82E+01	-8.60E+00	7.34E+00	-8.58E+00	-5.91E+00
	-500	-1.29E+01	-2.12E+01	-5.14E+00	-5.78E+00	-2.20E+01	-1.22E+01	-3.79E+00	-1.33E+01	-9.35E+00
-1000	-1.91E+01	-3.16E+01	-1.37E+01	-1.76E+01	-3.44E+01	-1.81E+01	-1.49E+01	-2.36E+01	-1.52E+01	
χ_{lf} (10 ⁻⁸ m ³ /Kg)		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
χ_{hf} (10 ⁻⁸ m ³ /Kg)		5.81E+01	7.28E+01	3.80E+01	3.34E+01	9.40E+01	3.11E+01	1.92E+01	4.62E+01	1.33E+01

Tabla 11.3.1 Magnetizaciones a diferentes campos aplicados H y susceptibilidades.

Continuación de tabla 11.3.1

		Muestra											
	H (mT)	5A	5B	5C	5D	5E	5F	6A	6B	6C	6D	6E	7
NRM (mAm ² /Kg)	0	5.75E-02	1.64E-01	1.85E+00	2.49E-01	1.15E-01	1.34E-01	6.82E+00	3.81E-01	1.84E-01	1.88E-01	2.78E-01	1.72E+01
	10	3.24E-01	2.66E-01	1.67E+00	4.52E-01	7.59E-02	3.79E-01	7.65E+00	6.22E-01	1.85E-01	3.69E-01	3.30E-01	1.50E+01
	50	1.12E+00	2.19E+00	1.09E+01	3.30E+00	1.61E+00	3.47E+00	2.58E+01	1.18E+01	7.80E-01	5.15E+00	2.01E+00	2.46E+01
	100	1.62E+00	3.70E+00	1.86E+01	5.41E+00	3.09E+00	5.75E+00	4.46E+01	1.73E+01	1.38E+00	8.86E+00	4.10E+00	4.63E+01
	200	1.94E+00	4.79E+00	2.28E+01	6.83E+00	4.25E+00	7.22E+00	5.30E+01	2.01E+01	1.88E+00	1.12E+01	5.72E+00	5.47E+01
IRM (mAm ² /Kg)	250	2.02E+00	5.04E+00	2.36E+01	7.11E+00	4.47E+00	7.57E+00	5.42E+01	2.06E+01	1.99E+00	1.17E+01	6.09E+00	5.51E+01
	300	2.07E+00	5.16E+00	2.39E+01	7.24E+00	4.60E+00	7.77E+00	5.44E+01	2.08E+01	2.05E+00	1.20E+01	6.27E+00	5.59E+01
	500	2.13E+00	5.34E+00	2.43E+01	7.45E+00	4.75E+00	7.98E+00	5.49E+01	2.10E+01	2.13E+00	1.22E+01	6.45E+00	5.70E+01
SIRM (mAm ² /Kg)	1000	2.18E+00	5.01E+00	2.44E+01	7.56E+00	4.82E+00	8.10E+00	5.54E+01	2.11E+01	2.17E+00	1.23E+01	6.54E+00	5.73E+01
	0	2.18E+00	5.01E+00	2.44E+01	7.56E+00	4.82E+00	8.09E+00	5.54E+01	2.10E+01	2.17E+00	1.23E+01	6.54E+00	5.73E+01
	-10	1.64E+00	4.40E+00	2.09E+01	6.19E+00	4.13E+00	6.48E+00	4.99E+01	1.56E+01	1.79E+00	1.00E+01	5.66E+00	4.77E+01
	-50	-4.36E-01	1.18E-01	-6.76E-01	1.87E-01	5.09E-01	-4.37E-01	4.51E+00	1.55E+01	8.52E-02	1.07E+00	7.21E-01	-5.87E+00
	-100	-1.28E+00	-2.68E+00	-1.49E+01	-3.99E+00	-	-4.61E+00	-3.72E+01	-6.45E+00	-1.02E+00	-7.10E+00	-2.96E+00	-3.96E+01
	-200	-1.81E+00	-4.47E+00	-2.21E+01	-6.30E+00	-2.11E+00	-7.07E+00	-5.29E+01	-1.58E+01	-1.81E+00	-1.09E+01	-5.49E+00	-5.22E+01
	-250	-1.93E+00	-4.84E+00	-2.31E+01	-6.72E+00	-4.24E+00	-7.54E+00	-5.41E+01	-2.03E+01	-1.97E+00	-1.16E+01	-5.97E+00	-5.38E+01
	-300	-2.00E+00	-5.03E+00	-2.37E+01	-6.94E+00	-4.46E+00	-7.75E+00	-5.49E+01	-2.06E+01	-2.04E+00	-1.19E+01	-6.19E+00	-5.42E+01
	-500	-2.09E+00	-5.25E+00	-2.41E+01	-7.26E+00	-4.66E+00	-8.01E+00	-5.53E+01	-2.09E+01	-2.13E+00	-1.22E+01	-6.45E+00	-5.58E+01
	-1000	-2.15E+00	-5.34E+00	-2.45E+01	-7.34E+00	-4.76E+00	-8.12E+00	-5.55E+01	-2.10E+01	-2.18E+00	-1.23E+01	-6.55E+00	-5.76E+01
χ_{lf} (10 ⁻⁸ m ³ /Kg)		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
χ_{hf} (10 ⁻⁸ m ³ /Kg)		6.96E+00	2.31E+01	7.57E+01	3.04E+01	1.99E+01	3.75E+01	1.19E+02	7.44E+01	9.81E+00	5.00E+01	2.68E+01	1.30E+02

Tabla 11.3.1 Magnetizaciones a diferentes campos aplicados H y susceptibilidades.

Muestra	Color Munsell	Descripción
1A	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con manchas muy negras pequeñas e irregulares
1C	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con grandes franjas negras
1D	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con pequeñas zonas negras
1F	2.5 YR ¾	Café oscuro rojizo con regiones negras
1G	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con manchitas negras
2A	2.5 YR ¾	Café oscuro rojizo con machas negras
2B	2.5 YR 2.5/4	Café oscuro rojizo con machas negras
2C	2.5 YR 2.5/4	Café oscuro rojizo con zona negra
2D	7.5 YR 2.5/2	Café muy oscuro casi homogéneo
2E	5 YR 3/3	Café rojizo oscuro con zonas negras
3A	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con machas y regiones negras
3B	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con manchas negras
3C	2.5 YR 2.5/4	Café oscuro rojizo con zona negra
3D	2.5 YR 3/6	Rojo oscuro con manchas negras
3E	2.5 YR ¾	Café oscuro rojizo con regiones negras
4A	7.5 YR 2.5/2	Café muy oscuro con manchas negras
4C	5 YR 3/3	Café rojizo oscuro con zonas negras
4D	5 YR ¾	Café rojizo oscuro con zonas negras
4E	7.5 YR 2.5/3	Café muy oscuro con manchas negras
5A	GLE Y1 3/N	Gris muy oscuro
5B	GLE Y1 3/N	Gris muy oscuro con marcas de burbujas, en algunas regiones translúcida
5C	GLE Y1 3/N	Gris muy oscuro
5D	GLE Y1 2.5/N con GLE Y1 3/N	Negra con bandas gris muy oscuro
5E	GLE Y1 2.5/N con 10 YR 6/6	Negra con una cara ligeramente color café amarillento
5F	GLE Y1 2.5/N con GLE Y1 7/N	Negra con bandas en color gris claro
6A	GLE Y1 2.5/N	Negra
6B	GLE Y1 2.5/N	Negra
6C	5Y 2.5/1	Negra translúcida
6D	5Y 2.5/1	Negra translúcida con segmentos lineales más oscuros
6E	GLE Y1 2.5/N	Negra con segmentos lineales más oscuros
7A	GLE Y1 3/N con 5 YR 4/6	Negra con segmentos de rojo amarillento

Tabla 11.3.2 Colores en muestras de Otumba

Muestra	Mr/Ms	Hcr/Hc
1A	0.321	2.893258427
2C	0.63	2.93627451
3C	0.496	3.40776699
3D	0.135	2.377142857
4A	0.529	2.5
5D	0.127	2.163934426
6A	0.169	2.038461538

Tabla 11.3.3 Cocientes de magnetización y coercitividad del Micromag.