



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTUDIO INTEGRAL DE LAS  
PROPIEDADES MAGNÉTICAS EN  
OBSIDIANAS DE MÉXICO CENTRAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A :  
GERMAN ALEXIS MANUEL VIVEROS



TUTOR

LUIS MANUEL ALVA VALDIVIA

Ciudad Universitaria, Ciudad de México  
2023



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.

*Si en la vida hemos escogido la posición desde la cual podemos trabajar más por la humanidad, ninguna carga nos puede doblegar, porque son sacrificios en beneficio de todos; entonces experimentaremos una no pequeña, limitada, egoísta alegría, pero nuestra felicidad pertenecerá a millones, nuestros hechos se vivirán calladamente, pero por siempre por el trabajo, y sobre nuestras cenizas se verterán las ardientes lágrimas de la gente noble.*

*Karl Marx*

*If you're going to try, go all the way*

*there is no other feeling like that.*

*[...]*

*You'll ride life straight to perfect laughter.*

*It's the only good fight there is.*

*Charles Bukowski*

***Este manuscrito va dedicado a los gigantes de mi existencia:***

***mi jefita Ana María Viveros Santiesteban***

***y mi papá German Manuel Martínez,***

***porque desde el sostén de sus hombros***

***siempre he logrado ir más allá...***

***Me han dado lo mejor de ustedes: cariño y educación,***

***ahora, es mi turno retribuir una ínfima parte:***

***para ustedes, lo mejor de mí.***

***El valor de ser a mí manera.***

**LOS AMO**

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Luis Manuel Alva Valdivia, el investigador más humano y auténtico que he podido conocer. Le agradezco la confianza, las charlas tan divertidas y llenas de enseñanza, el trabajo en campo, las salidas a congresos; el apoyo, las palabras justas y certeras que me guiaron una y otra vez a reivindicar mi camino universitario y personal, y, también... la enorme (en verdad enorme) tolerancia y comprensión que ha tenido. Gracias siempre, porque el impacto que ha tenido en mi persona trasciende el ámbito profesional; la irreverencia, la humildad, la autenticidad, el coraje y la determinación para buscar siempre la satisfacción por medio del buen trabajo en todo momento. Tales virtudes ahora son parte de mi máxima en la vida. *¡Salud!*

Al M. en C. Bernardo Ignacio García Amador, sin duda alguna de los mejores docentes que la universidad puede jactarse de tener. Mis gratitudes van aún antes de convertirse en mi sinodal y colega de magnetismo, le agradezco su enorme aporte como profesor a mi formación universitaria en la facultad, en campo y en el trabajo en el laboratorio de paleo. Si de algo es culpable, es de contagiarme el gusto por transmitir saberes y de buscar el mejor entendimiento posible de nuestro planeta no sólo para mí, sino que también para los demás.

A la Dra. Cecilia Caballero, que conocí desde el principio de mis estudios de licenciatura. Gracias por ser una figura constante en mi formación, las diversas charlas amenas en el cubo de estudiantes del Dr. Luis; los consejos, y las correcciones, también las críticas constructivas de mi tesis.

A la Dra. Ana María Soler Arechalde, que al igual que la Dra. Caballero, tuve el gustazo de conocerla desde el primer semestre. Al fin puedo agradecer aquella charla después de una clase de física del interior de la Tierra, cuando fue mi primer acercamiento al paleomagnetismo y arqueomagnetismo. La finalización de este estudio es una muestra del impacto que tuvo el gesto de obsequiarme aquella publicación realizada por usted, sobre arqueomagnetismo.

Dr. Guillermo Acosta Ochoa, primero que nada, por proporcionar la materia prima de este estudio. En segundo lugar, por los comentarios, correcciones y consejos en torno a la mejora en la redacción de este manuscrito. Igualmente, agradezco el tiempo otorgado en

el par de reuniones realizadas donde la discusión sobre las posibilidades a futuro sobre el estudio de obsidianas, promete ser ardua y gratificante.

Por su parte, este proceso no hubiera sido igual sin la bandera del grupo de paleomagos. Quiero agradecer de manera especial al M en C. Arnaldo Hernández Cardona. A lo largo de mi existencia dentro del grupo ha sido un guía igual de importante durante mi aprendizaje continuo de esto que se llama paleo y magnetismo de rocas. Al maestro Antonio González Rangel, por las charlas, las asesorías para medir en el pozo, y en campo; los cafés y esa agradable apertura de su persona siempre, que vuelve una agradable experiencia el trabajo dentro del pozo. Al Dr. Alejandro Rodríguez Trejo, por el tiempo invertido al momento de enseñarme cada uno de los programas utilizados en este trabajo, la manera de procesar los datos y las repetidas experiencias en campo. Al técnico Martín y, en su momento, a Víctor... gracias!

Es momento de agradecer a esas personas que tengo la fortuna de haberme vinculado en esta vida a ellos y siempre han sabido estar ahí. Quiero agradecer por siempre escucharme cuando se necesita y por brindarme su más sincera amistad y apoyo por sobre todas las cosas. A mi carnal Indihui, compañero de amistad perenne. A mis carnavales Aarón y Lalo, es momento de que suene *yellow ledbetter*. A Ana por ser mi incondicional desde el inicio. A mi compa de *labo*, el buen Isaac Pérez, compañero de exploración tlachiquera, gracias por tu amistad.

Y como lo bueno, generalmente viene al final, quiero agradecer a cuatro personas importantísimas para mí: mis hermanitas Ana, Roxana e Iris y a mi máster Raymundo. Gracias por todas las charlas, los regaños, los consejos y los comentarios a lo largo de toda la vida, la vida de facultad ¡y lo que falta!

Finalmente, a la burocracia de la Facultad de Ciencias y DGAE, por no dejarme sentir dentro de un bucle kafkiano más de medio año.

Índice	
<b>RESUMEN</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
<b>Caracterización Magnética de Obsidianas</b>	<b>10</b>
<b>Justificación</b>	<b>11</b>
<b>Objetivo General</b>	<b>12</b>
<b>Objetivos Particulares</b>	<b>12</b>
<b>ESTADO DEL ARTE EN MAGNETISMO DE ROCAS EN OBSIDIANAS</b>	<b>14</b>
<b>GENERALIDADES DE LOS SITIOS DE RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS</b>	<b>18</b>
<b>Descripción de zonas de recolección</b>	<b>18</b>
<b>Hidalgo</b>	<b>18</b>
<i>Sistema Tulancingo</i>	18
<i>Sistema Sierra de las Navajas (SDN)</i>	19
<i>Sistema Zacualtipán, Hidalgo</i>	21
<b>Puebla</b>	<b>21</b>
<i>Sistema Zaragoza-Oyameles</i>	21
<i>Sistema Paredón, Puebla/Hidalgo</i>	22
<i>Sistema de yacimientos asociados al volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba)</i>	22
<b>Estado de México</b>	<b>23</b>
<i>Sistema Otumba</i>	23
<b>Michoacán</b>	<b>24</b>
<i>Sistema Ucareo-Zinapécuaro</i>	24
<b>Obsidianas In Situ – Las Navajas, Hidalgo</b>	<b>25</b>
<b>PRINCIPIOS DE MAGNETISMO Y PROPIEDADES MAGNÉTICAS</b>	<b>27</b>
<i>Campo Magnético</i>	27
<i>¿Cómo se produce un campo magnético?</i>	27
<i>Inducción Magnética</i>	27
<i>Momento magnético</i>	28
<i>Magnetización</i>	29
<b>Magnetismo de rocas y minerales</b>	<b>29</b>
<i>Fundamentos de los óxidos de Hierro</i>	30
<b>Propiedades magnéticas de los minerales</b>	<b>31</b>
<i>Diamagnetismo:</i>	32

<i>Paramagnetismo:</i>	32
<i>Ferromagnetismo:</i>	32
<i>Magnetización Remanente Natural (NRM)</i>	33
<i>Susceptibilidad magnética inicial con relación al volumen (k)</i>	33
<i>Razón de Koenigsberger (Q)</i>	34
<i>Magnetismo Termoremanente (TRM)</i>	34
<i>Susceptibilidad en función de la temperatura (K-T)</i>	34
<i>Temperaturas de Curie <math>T_c</math></i>	35
<i>Estados de dominio magnético: SD, MD, PSD/Vortex</i>	36
<i>Ciclos de histéresis y curvas de adquisición de magnetismo remanente isoterma (IRM)</i>	37
<i>Curvas de desmagnetización de corriente continua (Backfield)</i>	39
<i>Cuantificación de la forma de ciclo de histéresis</i>	39
<i>Curvas Inversas de Primer Orden, FORC (por sus siglas en Inglés)</i>	39
<i>Curvas de Desmezcla (Unmix)</i>	41
<b>METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS MAGNÉTICO EN LABORATORIO</b>	<b>43</b>
<i>Antecedentes</i>	43
<i>Selección y preparación de las muestras</i>	43
<i>Obtención de muestras en Sierra de las Navajas, Hidalgo</i>	44
<b>Análisis de Laboratorio</b>	<b>44</b>
<i>Determinación de mineralogía magnética</i>	44
<i>Criterios de Selección</i>	45
<i>NRM y Susceptibilidad inicial</i>	45
<i>Susceptibilidad dependiente a la temperatura</i>	46
<i>Histéresis e IRM</i>	47
<i>FORC</i>	48
<i>Unmix</i>	49
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN PARTICULAR</b>	<b>50</b>
<b>Diagramas de NRM vs. k</b>	<b>50</b>
<i>Hidalgo</i>	50
<i>Puebla</i>	52
<i>Estado de México</i>	55
<i>Michoacán</i>	56

<b>Susceptibilidad Magnética en función de temperatura baja y alta (K-T)</b>	<b>58</b>
<i>Hidalgo</i>	58
<i>Puebla</i>	62
<i>Estado de México</i>	65
<i>Michoacán</i>	68
<b>Obsidiana In Situ de las Sierra de las Navajas</b>	<b>69</b>
<b>Propiedades magnéticas dependientes de campo magnético</b>	<b>72</b>
<i>Ciclos de histéresis, diagramas FORC y curvas Unmix</i>	72
<i>Hidalgo</i>	73
<i>Puebla</i>	78
<i>Estado de México</i>	80
<i>Michoacán</i>	83
<b>Obsidianas arqueológicas e 'in situ' no-orientadas</b>	<b>85</b>
<b>Diagramas de Day</b>	<b>91</b>
<b>Diagramas de Néel</b>	<b>96</b>
<b>DISCUSIÓN</b>	<b>99</b>
<b>Factor de Königsberger, Q.</b>	<b>99</b>
<b>Dependencia de las propiedades magnéticas vs. temperatura: curvas K-T.</b>	<b>100</b>
<b>Dependencia de las propiedades magnéticas vs. campo magnético: curvas de histéresis, FORC y desmezcla.</b>	<b>101</b>
<b>Implicaciones sobre la presencia de magnetita, titanomagnetita y demás fases magneto-mineralógicas en obsidianas</b>	<b>104</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>106</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>108</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>108</b>
<b>MATERIAL SUPLEMENTARIO</b>	<b>117</b>

## RESUMEN

En este estudio se reporta una la caracterización de propiedades magnéticas de obsidianas (i.e., vidrio volcánico rico en  $\text{SiO}_2$ , >65%) de 14 sitios (269 muestras) distribuidos en cuatro estados de la República Mexicana: Hidalgo, Estado de México, Michoacán, y Puebla, a lo largo del rasgo geológico-fisiográfico de la Faja Volcánica Transmexicana, además de fragmentos de obsidiana arqueológica y muestras *'in situ'* de la Sierra de las Navajas, Hidalgo. Tal caracterización micro-magnética se realizó con la intención de entender el comportamiento de este material volcánico desde la perspectiva del magnetismo de rocas y determinar la posibilidad de vincular artefactos arqueológicos con su fuente.

El trabajo incluye la medición de la magnetización remanente natural (NRM) y susceptibilidad magnética ( $k$ ), seguidas del monitoreo de algunas propiedades en respuesta a la aplicación de campos magnéticos, como: los ciclos de histéresis, la adquisición de las curvas de magnetización remanente isoterma (IRM) y su posterior análisis de desmezcla, (Unmix), así como las curvas inversas de primer orden (FORC); y/o propiedades magnéticas en dependencia de la temperatura como la susceptibilidad magnética vs. temperatura ( $k$ -T, desde  $-192\text{ }^\circ\text{C}$  hasta  $700\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Los gráficos de NRM vs. susceptibilidad muestran agrupamientos bien diferenciados y traslapes entre algunos grupos de obsidianas, indicando variaciones intra- e inter-flujo a partir de variaciones y/o equilibrio ( $Q=1$ ) en la magnetización inducida o remanente. La NRM muestra rangos de  $10^{-6}$  a  $10^1$  A/m, y la susceptibilidad magnética de entre 1 y 2000 ( $10^{-6}$ ) SI. El rango de valores del factor  $Q$ , 10 a 0.01 sugieren la predominancia de la magnetización inducida o remanente. A partir de estos comportamientos se seleccionaron muestras para efectuar los experimentos siguientes: curvas de histéresis,  $k$ -T, IRM y Unmix, que muestran una mineralogía magnética compuesta por magnetita, titanomagnetita y, en ciertos casos, un contenido menor de maghemita y hematita. Asimismo, los diagramas de Day, Néel y FORC, que sugieren los tipos de dominio magnético de los minerales portadores de la magnetización muestran la presencia de interacción entre estos dominios, encontrando predominantemente dominios simples, pseudo-simples (o vórtex) y menos de tipo múltiple. La integración de los parámetros magnéticos obtenidos permitió proponer hipótesis sobre la formación de los distintos tipos de minerales magnéticos, su contenido, tamaños inferidos, y dominios magnéticos en las diferentes obsidianas estudiadas. Estos resultados de las propiedades magnéticas dan la pauta para continuar estudios más profundos tanto de mineralogía magnética como del vector magnético completo (i.e., dirección e intensidad) de la magnetización remanente. A partir de un comportamiento

magnético no homogéneo en las obsidianas, tales estudios a detalle, llevarán a su vez a una mejor comprensión y modelado del campo geomagnético, y eventualmente, se podría lograr establecer el vínculo entre las muestras arqueológicas y geológicas, y por tanto las posibles fuentes de las obsidianas.

## **INTRODUCCIÓN**

### **Caracterización Magnética de Obsidianas**

La caracterización magnética se obtiene a partir de la medición y análisis de propiedades magnéticas inherentes a las rocas. Estas propiedades se deben a la existencia de partículas microscópicas principalmente, cuya composición incluye Fe, predominantemente en forma de óxidos de hierro y las interacciones de tales partículas entre sí.

Estudios previos de las propiedades magnéticas relacionados en obsidianas han planteado el interés por establecer una relación fuente-artefacto bajo un contexto arqueológico y geológico (e.g. McDougall et al., 1983; Urrutia- Fucugauchi, 1999; Vásquez et al., 2001).

En la última década los estudios han combinado experimentación de obsidianas arqueológicas y geológicas, entendiendo lo anterior como obsidianas que poseen un contexto arqueológico (asociadas a sitios arqueológicos) y obsidianas recolectadas en/o cerca de un afloramiento evidentemente natural.

Con relación a lo anterior, el estado del arte sobre las obsidianas y sus propiedades magnéticas se ha ido desarrollando de manera progresiva con un gran énfasis en determinar la procedencia de artefactos de obsidiana asociados a un contexto arqueológico y con posibilidad de ser vinculada a una determinada fuente volcánica.

Este tópico se adjudica una importancia de escala global puesto que a lo largo de la historia del desarrollo del ser humano y a través de diferentes culturas el vidrio volcánico o la obsidiana representa una materia prima fundamental para distintos procesos sociales, económicos, políticos, entre otros (Pastrana & Domínguez, 2009) .

A partir de esto, se han retomado y desarrollado los fundamentos establecidos por McDougall (1983), Zanella (2012) y Frahm & Feinberg (2013), quienes, basados en estudios previos, evalúan obsidianas arqueológicamente contextualizadas del Mediterráneo y otras partes del mundo, para relacionarlas a sus posibles fuentes volcánicas, enriqueciendo los resultados geoquímicos con un mayor número de pruebas magnéticas, evidencia que crea un criterio interdisciplinario de mayor alcance.

**Justificación**

En México no se tienen a la fecha estudios de magnetismo de rocas en obsidiana que señalen algo concreto, más allá de sugerir un mayor número de muestras a analizar y un mayor número de técnicas utilizadas, en cuanto a la tecnología se refiere (Urrutia-Fucugauchi, 1999; 2017). No obstante, la avasallante cantidad de regiones volcánicas presentes en México, en las que están presentes importantes yacimientos de obsidiana, y su riqueza arqueológica, representan una oportunidad para entender más del magnetismo en las obsidiana, así como su papel en la arqueología y la evolución volcánica de la región.

Por ende, el presente trabajo busca obtener la caracterización de 14 sitios de la región central de México procedentes de los estados: Estado de México, Hidalgo, Michoacán y Puebla, como se observa en la figura 1. Se recolectaron 20 fragmentos de tamaño guijarros (6–44 mm) por cada sitio de obsidiana, con el fin de establecer una especificidad inter-flujo a partir de las propiedades magnéticas, y así cimentar la plausibilidad de aplicación del magnetismo de rocas como una herramienta que enriquezca la caracterización de fuentes de obsidiana en materiales arqueológicos y, al mismo tiempo, tener un mejor entendimiento sobre el comportamiento de estos materiales volcánicos: vidrios volcánicos isotrópicos, ricos en  $\text{SiO}_2$  y de enfriamiento rápido.

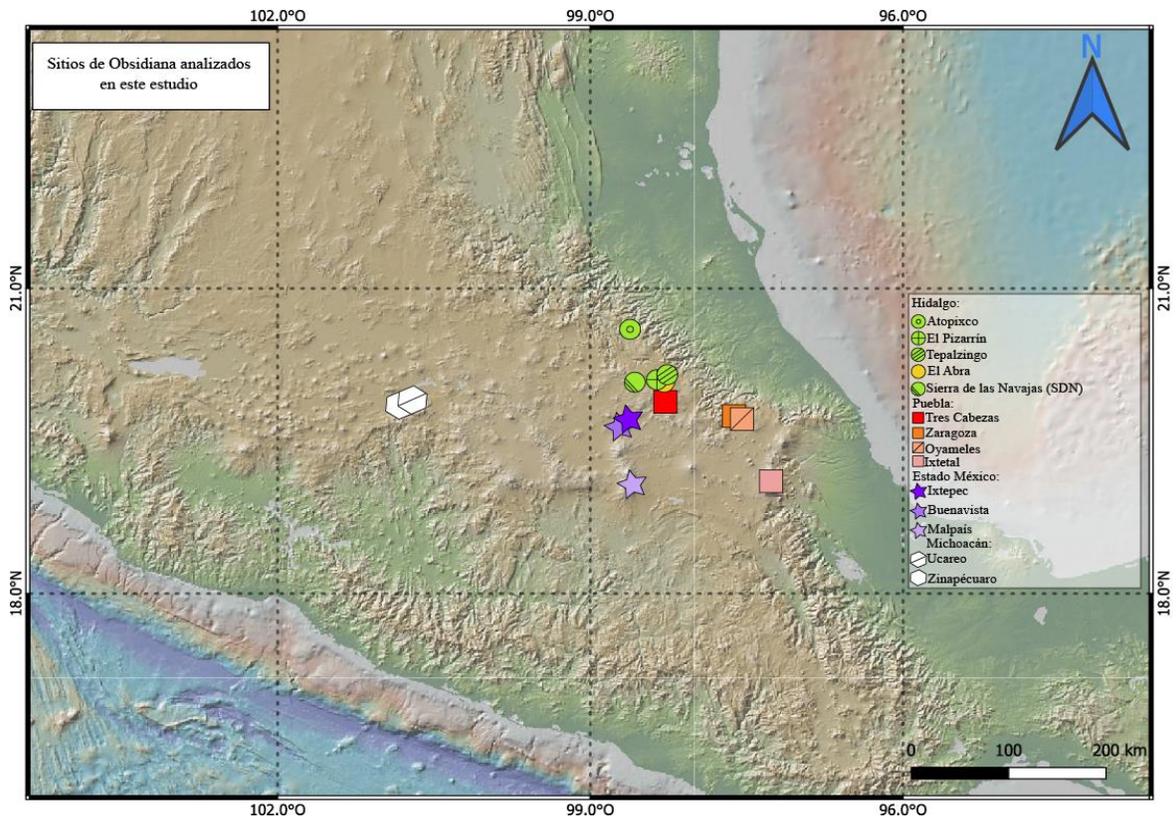


Figura 1. Mapa con los puntos georeferenciados de los sitios de recolección de obsidiana para este estudio. Hidalgo: Atopixco, El Pizarrín, Tepalcingo El Abra y Sierra de las Navajas (círculos verdes y amarillo). Puebla: Tres Cabezas, Zaragoza, Oyameles e Ixtetal (cuadros rojo y tonos naranjas). Estado de México: Ixtepec, Buenavista y Malpaís (estrellas moradas). Michoacán: Ucareo y Zinapécuaro (hexágonos blancos).

### Objetivo General

Realizar la caracterización de propiedades magnéticas en guijarros de obsidiana procedentes de 14 sitios a lo largo de la Faja Volcánica Mexicana para establecer el contenido de minerales magnéticos. La presencia de estos minerales puede ayudar a establecer una relación con la fuente volcánica. También, la caracterización de estos distintos sitios puede mostrar patrones de diferenciación a partir de su comportamiento magnético, ya sea a nivel flujo o entre flujos distintos de obsidiana.

### Objetivos Particulares

- Determinar la magnetización remanente natural (NRM, por sus siglas en inglés), así como la susceptibilidad magnética ( $k$ ), con el propósito de discriminar comportamientos distintos.
- Determinar la composición de la mineralogía magnética de cada muestra recolectada a partir de sus propiedades magnéticas.

- Determinar patrones en las propiedades magnéticas de manera global, para cada uno de los distintos sitios, con la intención de evaluar posibles diferencias intra-flujo a partir de la NRM, susceptibilidad magnética, parámetros de histéresis, curvas de susceptibilidad en función de alta y baja temperatura, diagnóstico de tamaño de partícula magnética (dominio magnético) derivado de curvas inversas de primer orden (FORC, por sus siglas en inglés) y separación de componentes magnéticos a partir curvas de separación de la magnetización remanente isoterma (IRM), también llamadas Unmix.
- Evaluación de cuatro fragmentos de obsidiana *in situ* sujetos a las pruebas antes mencionadas con el fin de determinar su relación con alguna posible fuente volcánica.

## ESTADO DEL ARTE EN MAGNETISMO DE ROCAS EN OBSIDIANAS

Los primeros estudios que emparentan a las obsidias con el magnetismo de rocas se da con el trabajo de McDougall et al. (1983), quienes analizan fuentes prehistóricas (obsidias con contexto arqueológico) procedentes de la región del Mediterráneo. Este estudio analiza tres parámetros magnéticos: (1) NRM, (2) magnetización de saturación, y (3) susceptibilidad magnética en campos magnéticos bajos. Si bien es un estudio pionero en el magnetismo de rocas, las premisas fundamentales que persigue son: probar la fiabilidad para establecer la procedencia de artefactos arqueológicos de obsidiana destacando su rapidez, el cuidado de las muestras que ofrecen cada uno de los experimentos y su relativa sencillez en cuanto a la replicación de experimentos en otras muestras y estudios sucedáneos.

Además, para un caso específico en México, previo a McDougall et al. (1983), considerado como una aproximación inicial al tópico, está el estudio de Regnard et al. (1981) donde cuantifican el estado de oxidación del hierro ( $\text{Fe}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ ) en la composición de obsidias provenientes de Lipari y Teotihuacán con espectroscopía de masa y fluorescencia de rayos X. Destaca el caso de las obsidias de Teotihuacán, donde reportan aglomerados de magnetita fina y ultrafina (100-900 Å), nanopartículas.

Volviendo a estudios desarrollados en obsidias del mediterráneo, Schmidbauer et al. (1986), analizan los parámetros de histéresis y reportan la agrupación de muestras de distintos sitios como resultado de un contenido de espinelas con rico contenido de óxidos de hierro o magnetita, reportado a partir de resultados de espectroscopía Mössbauer de  $^{57}\text{Fe}$  y obtención de temperaturas de Curie. De esta investigación se rescata la primera especulación sobre una variación de tamaño de grano magnético como factor que genera distintos grados de contribución a la coercitividad y coercitividad de remanencia. Igualmente, ellos señalan una relación directa entre los granos multidominio (MD), a valores altos de magnetización de saturación. Por último, asocian esta distribución de tamaños de grano para diferentes regiones.

Por su parte, Stewart et al., (2003), de igual manera intentan relacionar los parámetros histeréticos y de espectroscopía Mössbauer de  $^{57}\text{Fe}$  a 4 distintos sitios-islas del Mediterráneo que les sugieren una dependencia de los distintos parámetros magnéticos característicos para cada lugar. Además, a partir de los resultados del espectro Mössbauer analizado asumen una relación con lo que pueden distinguir y agrupar estos sitios a partir de sus estados de oxidación. Ellos concluyen que hay una contribución variable de magnetita y/o hematita en cada sitio, implicando un escenario de ambigüedad entre

similitudes y diferencias, y un adelanto de la posibilidad de afinar estos métodos a partir del uso de estadística de "agrupamientos" (*clusters*) para mejorar los resultados.

En otro caso, Weaver et al. (2009) trabajan 30 especímenes geológicos y a partir de la combinación de NRM, rangos inter-cuartil (IQR) y la susceptibilidad magnética de campo y frecuencia baja ( $X^{lf}$ ) señalan que estos parámetros: "parecen tener buen potencial para la discriminación de grupos. Sin embargo, los análisis estadísticos muestran un traslape significativo en los intervalos de confianza de estas variables..."

Por su parte, Zanella et al. (2012), analizaron los parámetros magnéticos como susceptibilidad magnética ( $K$ ) y anhisterética ( $X_a$ ), magnetización remanente isothermal de saturación a temperatura ambiente ( $SIRM_{298}$ ) y temperatura bajo cero utilizando nitrógeno líquido ( $SIRM_{77}$ ), así como sus cocientes de relación:  $X_a$  vs.  $X$  además del cociente  $S_T = \frac{SIRM_{77}}{SIRM_{298}}$ ; igualmente, el parámetro  $Q_a = \frac{X_a}{X}$  (utilizado para obtener una relación entre  $Q_a$  vs  $S_T$ ), encontrando una dispersión para cada uno de los cinco sitios analizados. También, realizan ciclos de histéresis a dos muestras piloto por sitio. Derivado de los resultados obtenidos en el cálculo del factor  $Q_a$  encuentran comportamientos asociados por influencias características de granos tipo dominio sencillo (SD; ver capítulo IV); en cuanto al factor  $S_T$ , éste establece una aproximación al contenido de granos superparamagnéticos (SP). Estos autores son los primeros en especular sobre la complejidad inherente a la interpretación de las propiedades magnéticas en las obsidianas: "La gran variación de los granos implica que cada uno de estos factores varía desde una escala de afloramiento hasta nivel de muestra". Del comentario anterior se inicia la concepción sobre el comportamiento no homogéneo y no isotrópico de las rocas, soportada por la gran dispersión en los resultados obtenidos.

Consecuentemente, Vázquez et al., (2001) analizan 176 fragmentos de sitios arqueológicos procedentes de Argentina y Chile. Sus resultados de NRM (ver capítulo 4) normalizada por peso, magnetización remanente isothermal a 0.35 T, y de susceptibilidad magnética volumétrica, 'bulk susceptibility' ( $k$ ) (ver definición en capítulo 4), muestran la posibilidad de identificar dos fuentes de procedencia del material vítreo a partir de la comparación de los valores obtenidos con valores de fuentes conocidas; de esta manera, si estos últimos son parecidos, se interpreta que pertenecen a dicha fuente. Sin embargo, ellos mencionan que, al utilizar un número mayor de muestras de las distintas fuentes, los agrupamientos que antes podían identificarse separadamente se traslapan, además de presentar una mayor dispersión, por lo que sugieren que este método de detección de procedencia es aplicable sólo a ciertas localidades.

Por su parte, Duttine et al. (2007) por medio del análisis de resonancia de espín (*SQUID*) y espectroscopía Mössbauer  $^{57}\text{Fe}$ , diferencian obsidianas procedentes de sitios de la caldera Quicatola, en Ecuador. Proponen el término de ‘fuente’ como un sinónimo de afloramiento geológico para referirse a los sitios de extracción de los materiales a analizar. A partir de sus resultados distinguen fuentes de dos flujos de lava distintos del volcán Cotopaxi, y junto con obsidianas arqueológicas establecen la procedencia de éstas comparado con valores conocidos de la fuente. La medición de algunas propiedades magnéticas, curvas de histéresis y variación en la magnetización de saturación y coercitividad, les permite separar claramente las obsidianas procedentes de diferentes fuentes. Junto con los resultados de ESR (resonancia de espín de electrones por sus siglas en inglés) ellos infieren la presencia de minerales como hematita, magnetita y espinelas; lo que corroboran con la cuantificación de iones de  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$  relacionados a óxidos de hierro cuyo contenido coincide con hematita y magnetita. Para el estudio del siguiente año, Duttine et al. (2008), incluyen obsidianas de otra caldera en Ecuador y repiten estudios de ESR y *SQUID*, logrando establecer diferencias entre las fuentes del material de esta otra caldera, así como de la caldera Quiscatela.

Thacker & Ellwood (2002) reportan una variación de susceptibilidad magnética en cuatro fuentes de obsidiana. Se enfocan principalmente en el análisis de la susceptibilidad magnética en esquistos asociados a contextos arqueológicos. Esto, de nueva cuenta establece una relación entre la variación de susceptibilidad magnética con la dinámica de diferenciar fuentes geológicas, entre y dentro de éstas. De esta manera, sus resultados sugieren un amplio rango de variación entre material de una misma fuente. A partir de estos resultados proponen utilizar esta metodología como una manera de análisis de procedencia. Algunos resultados asociados a un contexto arqueológico e histórico los lleva a especular sobre efectos ocasionados por la selección de la materia prima. La importancia de utilizar métodos magnéticos en investigaciones de procedencia arqueológica es justificada por los autores por tratarse de una potencial alternativa de estudio que implica ventajas económicas, de tiempo y con resultados concretos.

Estudios similares realizados en México se enfocan de manera fundamental en probar si la susceptibilidad magnética puede utilizarse como un método para discriminar y asociar materiales a sus fuentes (Church & Caraveo, 1996). Destaca la importancia dada a la magnetita como un vínculo fundamental en los experimentos sobre la procedencia, en lugar de asociarlo de manera más general al contenido global de una obsidiana. A las muestras les es realizado un análisis de composición geoquímica por fluorescencia de

rayos X (XRF) para probar su procedencia y composición. Church & Caraveo (1996) reportan una variación en la susceptibilidad magnética de distintas localidades geográficas, y sugieren una posible correspondencia entre las muestras con campos volcánicos o, más específicamente, con cámaras magmáticas individuales como su lugar de procedencia. Especulan la relación de variación de la susceptibilidad magnética con un patrón de variación a escala geográfica; la variación puede ser determinada a escala de la fuente o cámara magmática; los resultados con un patrón espacial se asocian a cámaras magmáticas y/o se emparentan con flujos individuales. Esta perspectiva interpretativa puede ser útil al momento de pensar en el rol que podrían jugar las escalas geográficas, así como los objetivos perseguidos por investigaciones posteriores.

Además, es menester indicar que se han reportado resultados de distintos parámetros magnéticos en afloramientos de obsidiana con alta variación intra-flujo, dificultando la determinación precisa de la procedencia magnética (Urrutia-Fucugauchi, 1999; Vázquez et al., 2001; Zanella et al., 2012; Frahm et al., 2014).

Adicionalmente, Frahm y Feinberg (2013a, 2013b), y Frahm *et al.* (2016) ahondan en dicha variación intra-flujo y proponen que ésta permite una mejor comprensión de las propiedades magnéticas de las obsidianas en términos multi-escalares, desde la concepción inicial para rastrear fuentes de extracción arqueológica, como en la estructura de un mismo afloramiento/flujo.

## **GENERALIDADES DE LOS SITIOS DE RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS**

La obsidiana es una roca volcánica cuya composición es de intermedia a ácida, con una matriz compuesta predominantemente de vidrio. Se forma cuando una lava con alto contenido de sílice  $\text{SiO}_2$  se enfría rápidamente por un proceso de nucleación y crecimiento de minerales, ocasionando un arreglo estructural vítreo.

Las lavas que forman este tipo de roca son típicamente de composición riolítica, esto es, con un contenido en  $\text{SiO}_2 > 66\%$  y son altamente viscosas. Los procesos atípicos asociados a formación de obsidiana se asocian con fundidos pobres en sílice pero que igualmente solidifican de manera rápida como aquellos de composición dacítica o traquítica (Williams-Thorpe, 1995).

Un proceso indirecto de formación de la obsidiana se asocia a la capacidad que posee de desvitrificar (transformarse) como un proceso posterior a su emplazamiento; esto puede ser algún fenómeno de recalentamiento o percolación de fluidos promoviendo la nucleación e intercrecimiento de formas cristalinas distintas (Williams-Thorpe, 1995).

Las características anteriores permiten que la obsidiana se exponga en superficie de manera análoga a la perlita, es decir, ambas poseen capacidad de hidratarse (retener entre el 2-5% de agua en su estructura) de manera gradual en el tiempo, sin modificar su composición parental, riolítica (Hinojosa-Prieto, 2016). Entonces, es un vidrio volcánico silíceo, hidratado y amorfo que se forma por alteración secundaria derivada de una lenta difusión de agua en la estructura vítrea bajo condiciones superficiales de temperatura (Hinojosa-Prieto, 2016).

### **Descripción de zonas de recolección**

Nota: La nomenclatura empleada de sistema, localidad y yacimiento es la sugerida por Cobean, 2002 y García, 2018. En la tabla 3 del material suplementario (ver página 114) se agrupan los yacimientos de obsidiana asociados a los sitios estudiados, coordenadas geográficas y edad relativa.

### **Hidalgo**

*Sistema Tulancingo*

*Localidades El Pizarrín y El Abra*

Este sistema de yacimientos se ubica en el valle de Tulancingo, dentro del municipio de Tulancingo de Bravo; se compone de dos yacimientos de obsidiana, El Abra y El Pizarrín, separados aproximadamente por cinco kilómetros (García, 2018; Gaxiola y Nelson, 2005; Glascock, 2002; Glascock *et al.*, 1998).

#### El Abra

El Abra se encuentra aproximadamente a 4.3 kilómetros al sureste del sitio de Huapalcalco. La obsidiana de este lugar adquiere tonalidades verdosas, similares a las de Sierra de las Navajas (García, 2018).

#### El Pizarrín

Pertenecientes al sistema Tulancingo. Estas localidades son parte de otras cuatro reportadas que en conjunto comienzan entre los 8 ó 10 km al oriente de la Sierra de Pachuca y son observables en un área de aproximadamente 80 km<sup>2</sup>, asociadas tanto geológica como químicamente con las de Sierra de las Navajas, aunque pueden ser diferenciables entre ellas por otras propiedades (Cobean, 2002).

La obsidiana de Tulancingo y por tanto de los yacimientos que conforman a este sistema suelen variar de negro a gris opaco con un ligero tinte verdoso; se distingue del verde transparente de la Sierra de las Navajas al ser más opaca y con textura más gruesa.

Las formaciones de obsidiana asociadas a este sistema poseen rasgos naturales que la han catalogado desde tiempos antiguos como materia “de buena calidad”. Por esto, se han establecido minas y talleres para la producción de herramientas, así como el complejo minero-artesanal más grande de la región de Tulancingo, el que comienza en el extremo sur de Huapalcalco, sobre las laderas del Cerro Tecolote, aproximadamente a tres kilómetros al noreste del poblado Tulancingo. Tal localidad es conocida también con el nombre de El Pizarrín, nombre del rancho al que pertenece gran parte de la tierra circundante (Muller, 1957, Cobean, 1971, Pires-Ferreira, 1975).

#### *Sistema Sierra de las Navajas (SDN)*

Conocido por diferentes nombres según la geografía de esta localidad, se puede encontrar referenciada como El Durazno, Cerro Pelón, Cruz del Milagro, Los Pelados, Cerro de las Navajas, entre otros (Cobean, 2002; Charlton y Spence, 1982). Se localiza

aproximadamente a 50 km al noreste de la Ciudad de México y 15 km en línea recta de la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo (García, 2018).

De este sistema de yacimientos se destacan dos aspectos: el primero es su catalogación como el sistema de yacimientos de obsidiana más grande del centro de México; el segundo es que éste fue la fuente de obsidiana más importante del norte de Mesoamérica en tiempos prehispánicos y derivado de esto, es el sistema con mayor investigación hasta el momento. (Cobean, 2002).

La gran mayoría de la obsidiana de este sistema es verde brillante, rasgo único entre las obsidias de México Central. Sin embargo, en la parte sur de la Sierra de Pachuca se encuentran variedades con tintes translúcidos, que, al observarse a contraluz, manifiestan tonos dorados estéticamente atractivos a la apreciación visual.

Con respecto a la geología, la obsidiana de Sierra de las Navajas (en adelante abreviada como SDN) pertenece a un volcán riolítico extinto de composición peralcalina ubicado al norte de la faja volcánica, al sur de la Sierra Madre Oriental y entre las ciudades de Pachuca y Tulancingo, Hidalgo.

La geomorfología del Sistema Sierra de las Navajas obedece a la configuración de un estratovolcán de composición riolítica con afinidad hiperalcalina, iniciando su actividad volcánica hace aproximadamente 2.4Ma (López-Velarde. 2020; Lighthard, 2001). La geología de Cerro de las Navajas (porción Sur-Oeste de Sierra de las Navajas) se conforma de una estratigrafía compuesta, descrita por Donato et al., 2017 como una secuencia de depósito pumicítico de caída libre, tipo estromboliano; posterior a esto, una oleada piroclástica; encima de esta, ocurre un derrame de lava con base brechada donde se encuentra la obsidiana verde. La secuencia estratigráfica es dividida y descrita en forma de dos unidades volcánicas por López-Velarde (2020) de la siguiente forma: (1) Unidad de corrientes Piroclásticas Densas y fluidas (UCPD) y (2) Unidad Fluides Itztetl (UFI).

#### *Tepalzingo*

Se encuentra a cinco kilómetros al noreste del sistema Tulancingo. Su obsidiana es químicamente similar a la de los yacimientos de Tulancingo, no obstante, son distinguibles entre ambos (Cobean, 2002). Esta localidad se compone de densas concentraciones de

afloramientos y de guijarros de obsidiana que cubren aproximadamente dos kilómetros cuadrados circundantes al poblado de Tepalzingo (Cobean, 2002).

### *Sistema Zacualtipán, Hidalgo*

#### *Atopixco*

Al sureste del municipio de Zacualtipán se encuentran grandes flujos de obsidiana en la superficie o cerca de ella en un área de aproximadamente 60 km<sup>2</sup> (Yacimiento Zacualtipán). En los alrededores y debajo del poblado de Atopixco, de ahí el nombre de la localidad muestreada, se encuentra el sitio de recolección de muestras, aproximadamente a siete kilómetros al sur de la cabecera municipal (García, 2018; Cobean, 2002). Además, Cobean (2002) señala la dificultad de la localización específica de los yacimientos y minas de obsidiana derivado de la vegetación altamente densa de bosques de pino junto con una topografía montañosa altamente escabrosa y atravesada por cañadas de hasta veinte metros de profundidad. Los complejos mineros y talleres más grandes reportados poseen una dimensión variable de entre tres y medio y siete kilómetros al suroeste de Zacualtipán, cerca de la carretera federal 105 y se encuentran limitados por el poblado “La Obsidiana”.

## **Puebla**

### *Sistema Zaragoza-Oyameles*

#### *Oyameles*

Al oriente de la ciudad de Puebla, cerca de los límites estatales con Veracruz, se encuentra un conjunto de yacimientos de obsidiana y afloramientos de guijarros geológicamente asociados entre sí y distribuidos en una gran área entre los poblados de Zaragoza y Teziutlán, así como al sur de una comunidad llamada Oyameles (Cobean, 2002). Ferriz (1985) y geólogos de la Comisión Federal de Electricidad apuntan que dicho sistema de yacimientos forma parte de la ignimbrita Xaltipan con un área de extensión de alrededor de treinta kilómetros cuadrados hacia el poniente y el sur de Zaragoza. Esos yacimientos fueron formados por erupciones volcánicas distintas que dieron origen a la obsidiana en las laderas oriental y occidental del Pico de Orizaba más al sur (Valle de Ixtetal y Guadalupe Victoria-Derrumbadas, respectivamente) (Cobean, 2002).

### *Sistema Paredón, Puebla/Hidalgo*

#### *Tres Cabezas*

El sistema Paredón se localiza entre los estados de Puebla e Hidalgo, formando parte de la caldera volcánica Tulancingo-Acuiculco (López-Hernández et al., 2009). De la región, se han identificado seis grandes depósitos de obsidiana (Millhauser et al., 2017).

El área del yacimiento Paredón se encuentra aproximadamente a veinte kilómetros al sur de Tulancingo. Los filones de obsidiana de este sistema cubren una superficie aproximada de treinta kilómetros cuadrados localizados entre Hidalgo y Puebla, mayormente en Hidalgo (Cobean, 2002). En el subsuelo de la región Paredón se encuentra un yacimiento de obsidiana que es apreciable a través de diferentes ajustes morfológicos de la zona como barrancas o colinas bajas donde se encuentra una gran concentración de cantos o guijarros de hasta cuarenta centímetros de diámetro. Se ha llegado a encontrar con inclusiones cristalinas y burbujas inmersas dentro del material; el tono predominante es gris transparente y presenta pequeñas bandas o estrías con un gris ligeramente más oscuro (Cobean, 2002). El mismo autor señala la existencia de estudios asociados a tres localidades de índole arqueológica dentro de la zona del Paredón, una de ellas circunda al poblado de Tres Cabezas, ubicada a dos kilómetros y medio hacia el noroeste de Paredón y que, por tanto, representa el nombre de la zona muestreada.

### *Sistema de yacimientos asociados al volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba)*

Se encuentra a doscientos kilómetros al sureste de la Ciudad de México bordeando los límites de los estados de Puebla y Veracruz y a una altitud de 5,700 metros. Esta línea divisoria separa al volcán y sus laderas en los sectores orientales (lado de Veracruz) y occidentales (lado de Puebla) (Cobean, 2002). El mismo autor menciona que se han reportado al menos seis yacimientos de obsidiana de diferentes dimensiones en zonas cercanas a las laderas del Pico de Orizaba. Más aún, estos afloramientos posiblemente forman parte de dos o tres sistemas de yacimientos geológica y químicamente distintos.

#### *Ixtetal*

Esta localidad es parte del municipio de Tlachichuca, Puebla, sobre la ladera norte del volcán Pico de Orizaba, aproximadamente a ocho kilómetros al norte de la cima del volcán. Igualmente, se asocia a un gran complejo de minas de obsidiana prehispánica ubicadas

también en la ladera norte del volcán, aproximadamente a veinte kilómetros al noroeste de Coscomatepec, Veracruz, desde donde se accede en automóvil a través de una carretera pavimentada hasta llegar a la localidad llamada Nuevo Jacal. El nombre Ixtetal, designado por los agricultores de poblados cercanos a la zona, significa “Valle de Obsidiana”. La mayor parte de esta obsidiana es de tonos gris claro nuboso con numerosas bandas finas negras o gris oscuro en toda la matriz vítrea; su textura es burda con respecto a otros yacimientos del centro de México, esto quizá debido a las inclusiones del vidrio (Cobean, 2002).

## **Estado de México**

### *Sistema Otumba*

Se encuentra aproximadamente a ocho kilómetros al oriente del poblado de Otumba, presentando afloramientos esporádicos y concentraciones importantes de guijarros que cubren un mínimo de cuarenta kilómetros cuadrados sobre las laderas orientales del valle de Teotihuacán, específicamente sobre el occidente del cerro Soltepec (Cobean, 2002; Soto de Arechavaleta, 1990). Dicha extensión en la disposición del material se debe a los procesos erosivos de los cañones que han arrastrado gran cantidad de obsidiana hacia el Valle (Cobean, 2002). Los afloramientos más densos se localizan en el costado poniente del domo Soltepec y los cañones que lo rodean, principalmente la barranca de los Estetes que inicia por el flanco noreste de dicho volcán (Charlton y Spence, 1982). La estructura volcánica de esta región se compone de una serie de domos de composición calco-alcalino riolítico como edificios principales así como secuencias de flujos de obsidiana emplazados al noroeste. La formación de tales centros eruptivos está localizada a lo largo del cerro Soltepec y se vincula al emplazamiento del conjunto de domos con dirección noroeste-sureste (Hernández, 2007). En estos yacimientos prevalece una amplia variedad de color, la mayoría con tonos grises oscuros semi translúcidos con un ligero toque lechoso; no obstante, también se presentan grandes cantidades de una obsidiana gris casi opaca (Cobean, 2002). Glascock *et al.* (1994) señalan la existencia de una obsidiana que también presenta vetas o manchas rojizas o marrones sobre una matriz gris o negra presente en menores proporciones al resto de los yacimientos comunes de obsidiana con otras características.

### Buenavista

El sitio Buenavista, localizado en las inmediaciones del yacimiento Malpaís, en los límites de la gran zona de abastecimiento prehispánico, pertenece al yacimiento Soltepec a nueve kilómetros de la cabecera del municipio de Otumba y a kilómetro y medio de la población con el mismo nombre. Es una concentración de material sobre una colina llamada Loma Buenavista, cuya importancia radica en ser una de las pocas zonas donde se encuentran minas y talleres en la región (Cobean, 2002).

### Cerro Ixtepec

El domo Cerro Ixtepec contiene por el lado noroeste un afloramiento de obsidiana que lleva el mismo nombre. Se encuentra cortado por una barranca con orientación noroeste contenedora de numerosos nódulos de obsidiana apreciables a simple vista a lo largo de algunos kilómetros (García, 2018).

### Malpaís

Según Cobean (2002), el yacimiento de Malpaís está formado por tres filones de obsidiana genéticamente asociados que se encuentran aproximadamente a doce kilómetros al este de Otumba. Estos filones de riolita y obsidiana se separan de los de Otumba por formaciones masivas de basalto. Sin embargo, (Hernández, 2007) asocia el yacimiento Malpaís con un domo pequeño parcialmente sepultado por lavas andesíticas del cerro Cuello y ceniza transportada eólicamente. Los filones reportados por Cobean son re descritos por Hernández (2007) como intercalaciones de flujos de obsidiana y riolita microcristalina.

## **Michoacán**

### *Sistema Ucareo-Zinapécuaro*

Este sistema se ubica en la zona noreste del estado de Michoacán. Dicha región se caracteriza por ser un terreno plano y estar dominada por sedimentos lacustres de la cuenca del lago Cuitzeo; por el lado oriental de la cuenca se encuentran una serie de domos riolíticos y conos de ceniza que proporcionan al paisaje una apreciación contrastante para el poblado de Zinapécuaro (Healan, 1997). A partir de los estudios de Cobean (2002), Glascock (2002), y Healan (1997) se concibe este sistema conformado por los yacimientos de Zinapécuaro, Ucareo y Cruz Negra. No obstante, para este estudio se llevaron a cabo

análisis únicamente para los yacimientos de Ucareo y Zinapécuaro. La región Ucareo-Zinapécuaro incluye tres afloramientos de obsidiana formados en distintos momentos (Nelson y Healan, 1995).

#### Ucareo

Localizada en el poblado con el mismo nombre, esta localidad yace en el municipio de Zinapécuaro. La obsidiana de Ucareo es gris-oscuro translúcida y comúnmente contiene bandas grises paralelas muy delgadas, además, en ocasiones posee una textura nubosa sin bandas (Cobean, 2002). Esta misma fuente constituye una veta que rodea los flujos o depósitos de guijarros de obsidiana localizados en superficie o cerca de ella y cubren aproximadamente 80 kilómetros cuadrados. De manera adicional, el autor señala que, a menos de quince kilómetros de distancia hacia el este, se encuentra una elevación mayor de setecientos metros, en un valle que es parte de una caldera antigua. Este valle, nombrado “Valle Ucareo”, se flanquea por colinas boscosas y otras morfologías derivadas de domos riolíticos y pequeños conos de ceniza como aquellos que se distribuyen alrededor de Zinapécuaro.

#### Zinapécuaro

Se encuentra dentro del municipio que lleva el mismo nombre. Actualmente, este yacimiento está debajo del poblado Zinapécuaro (García, 2018). La fuente de éste es una veta de obsidiana identificada por Nelson y Healan (1995) ubicada dentro y al sur del poblado. De igual forma, la veta Ucareo rodea la población a unos seis kilómetros al noroeste; una gran extensión de este poblado se encuentra encima de un enorme flujo de obsidiana asociada a un domo riolítico (Joron *et al.*, 1990; Nelson y Healan, 1995;). Estos afloramientos abarcan una superficie aproximada de ochenta kilómetros cuadrados de depósitos de guijarros de obsidiana. A seis kilómetros al noroeste de esta región se encuentra el filón llamado Cruz Negra y, finalmente, la veta Ucareo que rodea el área de esa población (Cobean, 2002).

### **Obsidianas In Situ – Las Navajas, Hidalgo**

Se recolectaron cuatro muestras de mano, sin orientar, procedentes de distintas zonas que bordean la región montañosa de Sierra de las Navajas y, por tanto, son obsidianas con características macroscópicas distintas. El nombre de cada muestra trata de referir el lugar

del cual fue extraído, como muestras de mano. Cada uno de estos yacimientos asociados están nombrados como (1) OBS PERL, (2) OBS MULTICOLOR, (3) OBS MINA PMZ Y (4) OBS DORADA y refieren a particularidades específicas tanto petrológicas como geológicas en el capítulo 2 del trabajo de López-Velarde (2020) así como a unidades geológicas de corrientes piroclásticas (1); Unidad fluidal Iztetl; (3) Mina de obsidiana Alfajoyucan y (4) Depósito de bloques y ceniza.

## PRINCIPIOS DE MAGNETISMO Y PROPIEDADES MAGNÉTICAS

Este capítulo es una síntesis del trabajo de Jiles (1991) con la intención de expresar los principios conceptuales del magnetismo.

### *Campo Magnético*

El concepto de campo magnético es una idea fundamental dentro del magnetismo. No obstante, ¿a qué nos referimos por campo magnético? Cuando un campo magnético es generado en un volumen de un espacio significa que hay un cambio de energía en ese volumen, se da paso a un gradiente energético que permite se produzca una fuerza que puede ser detectable. Algunos procesos a través de los cuales se puede detectar este fenómeno son: la aceleración de una carga eléctrica moviéndose en el campo; debido a la fuerza sobre un conductor de corriente; por medio del torque ejercido en un dipolo magnético (aguja de brújula); o incluso, por la reorientación de espines en electrones contenidos dentro de cierto tipo de átomos.

### *¿Cómo se produce un campo magnético?*

La generación de los campos magnéticos se asocia estrechamente a cargas eléctricas en movimiento. De igual modo, se pueden producir gracias a un imán permanente. El mecanismo generador de este fenómeno en el imán, reside en los movimientos orbitales y de los espines de los electrones dentro del material, esto guía a una magnetización dentro del material y al mismo tiempo, a la generación de un campo fuera de este cuerpo. Dicho campo externo ejerce una fuerza tanto en conductores de corriente como en imanes permanentes.

### *Inducción Magnética*

Cuando un campo magnético es generado por una corriente eléctrica en un medio, la respuesta de este campo es la inducción magnética (llamada también densidad de flujo). Este tipo de inducción se describe en términos de la fuerza en una carga eléctrica en movimiento o corriente eléctrica. La relación entre inducción magnética (B) y campo magnético (H) se conoce como permeabilidad del medio. De manera particular, se considera que un espacio libre es un medio donde la inducción magnética es producida por la presencia de un campo magnético. Así, la ecuación que relaciona estos conceptos es:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (1)$$

Donde  $B$  es la inducción magnética,  $\mu_0$  representa la constante universal de permeabilidad de espacio libre y  $H$  el campo magnético.

### Momento magnético

Para definir el momento dipolar magnético o momento magnético (simbolizado como  $M$ ) se puede pensar en dos fenómenos asociados a corrientes eléctricas. Ya sea como un par de cargas magnéticas o como un circuito de corriente eléctrica. Bajo la suposición del primer escenario, la magnitud de carga será  $m$  y la carga positiva y negativa estarán separadas por un vector cuya distancia es infinitesimal, llamado  $l$ , como se observa en la figura 2, de manera que el momento magnético es proporcional al incremento de la carga positiva, dicho de otro modo:

$$M = m l \quad (2)$$

Por su parte, el segundo supuesto, consiste en un circuito con un área de valor  $A$  conteniendo una corriente eléctrica  $I$ , por lo que el momento será:

$$M = I A n \quad (3)$$

en donde  $n$  es el vector de longitud perpendicular al plano del circuito. Este vector será pensado como el momento magnético ( $M$ ) cuya dirección correcta será determinada por la "regla de la mano derecha". Nota: en ambas fórmulas anteriores, La letra  $I$  es la misma, no obstante, ambas refieren a procesos distintos (ver Jiles, 1991).

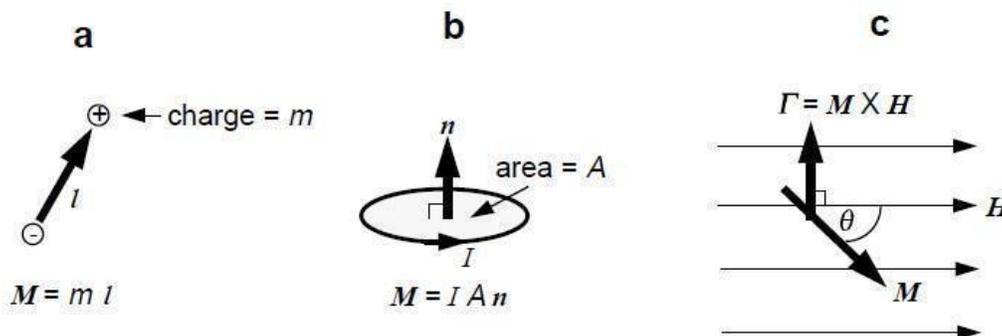


Figura 2. a) Modelo de dipolo magnético construido a partir de dos cargas magnéticas. b) Dipolo magnético formado por un circuito circular de corriente eléctrica. c) Diagrama de ocurrencia del Momento de fuerza o torque  $\Gamma$  sobre el momento magnético ( $M$ ), inmerso dentro del campo magnético  $H$ . Modificado de Butler (1992).

Que el momento magnético sea conceptualizado como un vector (cantidad con magnitud y dirección) es fundamental para el magnetismo de rocas pues la descripción fenomenológica anterior es primordial en dicha disciplina. El campo magnético ( $H$ ) en una región, se define como la fuerza experimentada por una carga magnética unitaria positiva que se encuentra ubicada en dicha región. Entonces, el gradiente energético y la fuerza generada por este, se puede imaginar como un momento de fuerza que trata de crear una alineación ( $T$ ) dado por el producto cruz, tal que:

$$T = M \times H = MH \sin \theta \tau \quad (4)$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre  $M$  y  $H$  como se aprecia en la figura 4.1c y  $\tau$  es el vector unitario paralelo a  $T$ .

#### *Magnetización*

Llamada también intensidad de magnetización ( $J$ ) de un material, es el momento magnético neto por unidad de volumen en un material. Existen dos tipos de magnetización: *magnetización inducida* y *magnetización remanente*. Cuando un material es expuesto a un campo magnético ( $H$ ), entonces adquiere una magnetización inducida ( $J_i$ ) que se relaciona a su vez, con la *susceptibilidad magnética* ( $X$ ):

$$J_i = X H \quad (5)$$

Entonces, la susceptibilidad magnética puede conceptualizarse como la facilidad con la que una sustancia o un material se puede magnetizar. Por su lado, la magnetización remanente es la que adquieren los minerales ferromagnéticos y que permanece aún sin la presencia de un campo magnético. Además, que un material posea una magnetización remanente ( $J_r$ ) implica que puede registrar, almacenar o guardar una señal de campos magnéticos que han actuado en el material en el pasado.

#### **Magnetismo de rocas y minerales**

El magnetismo de rocas se encarga de estudiar el comportamiento magnético de algunos minerales contenidos dentro de las rocas. Estos minerales son únicos pues poseen la capacidad de *guardar* una señal en forma de vector (intensidad y dirección) de un campo magnético existente durante sus diversos procesos de formación.

Aunado a los conceptos explicados, la razón de ser del magnetismo de rocas radica en parte mayoritaria, en la configuración electrónica que poseen algunos átomos conformantes de los minerales magnéticos; un fenómeno cuántico que dicta la manera en que estos

minerales responden a la inducción y posible remanencia tras la aplicación de un campo magnético: *exchange coupling* o intercambio de acoplamiento. Adicionalmente, dichos minerales están compuestos de hierro (Fe), el mineral de transición más abundante. Este puede estar distribuido tanto en fases magnéticas como no-magnéticas y a través de distintos procesos en el tiempo geológico puede cambiar entre fases químicas a partir de procesos como alteración, solución, precipitación o metamorfismo, entre otros (O'Reilly, 1984).

### Fundamentos de los óxidos de Hierro

Los minerales contenedores de hierro en su composición engloban las características esbozadas anteriormente. No obstante, para profundizar más, debemos introducirnos en el tema de la composición de estos minerales. Algunas especies minerales magnéticas suelen representarse a través de diagramas ternarios, en específico para los óxidos  $\text{FeO} - \text{TiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Para las transformaciones que producen óxidos magnéticos el mineral puede aparecer en el diagrama a partir de algún punto fuera de este. Entonces, el diagrama representa proporciones relativas de los cationes  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Ti}^{4+}$  (O'Reilly, 1984). Los minerales magnéticos primarios son las titanomagnetitas con una composición aproximada que se indicada en el punto TM60, como se observa en la figura 3. Tales minerales cristalizan inmediatamente durante los procesos de formación, y durante la historia geológica la composición de la fase magnética cambiará, generalmente hacia la esquina derecha del diagrama (procesos de oxidación) y hacia abajo, llegando a la última fase estable, la hematita.

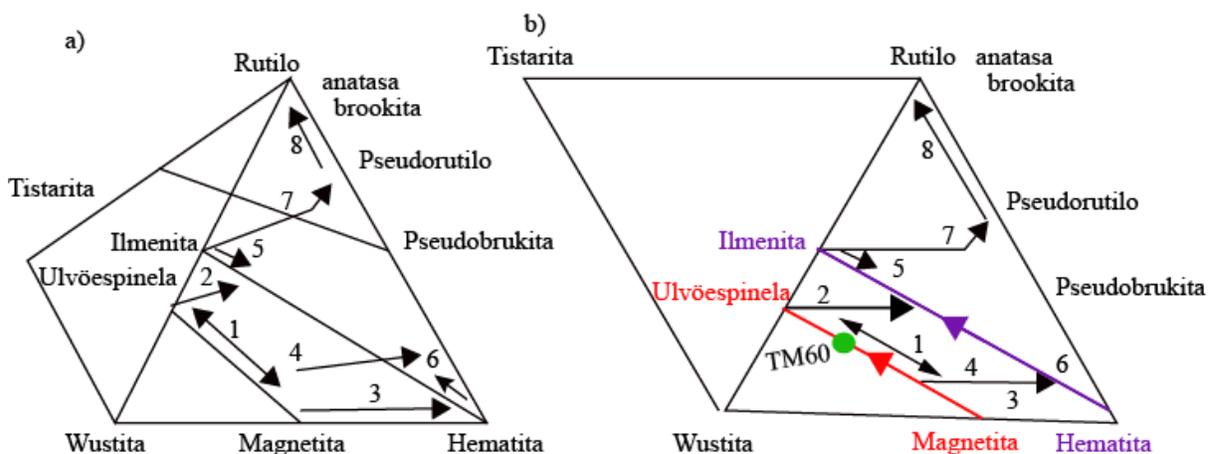


Figura 3. Diagramas ternarios de los óxidos de hierro; a) es el diagrama  $\text{FeO}-\text{TiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$  y b) el diagrama "ión simple"  $\text{FeO}-\frac{1}{2}\text{TiO}_3-\text{TiO}_2-\frac{1}{2}\text{Fe}_2\text{O}_3$ , que muestra las principales series minerales (morado y rojo para soluciones sólidas de hematita y magnetita respectivamente) y de exsolución así como procesos de oxidación. (1) Exsolución de Uivöespinela desde Titanomagnetita. (2)

Oxidación Ulvöespinela a Ilmenita. (3) Oxidación de Magnetita a Maghemita. (4) Oxidación de TM (titanomagnetita a titanomaghemita. (5) Exsolución de hematita desde Ilmenita. (6) Exsolución de ilmenita desde hematita. (7) Alteración de ilmenita a pseudobrookita. (8) Alteración de pseudobrookita a rutilo. El punto verde señala la posición de titanomagnetita enriquecida en titanio (TM60). Modificado de Bowles et al. (2011).

Algunos de los procesos de transformación mineralógica que pueden darse a lo largo de la historia formativa de una roca, se indican en la figura 3. Una oxidación a baja temperatura o maghemitización produce una titanomaghemita, fase mineral cuya estructura es metaestable lo que implica la posibilidad de que esta fase pueda invertirse produciendo magnetita o hematita, dicha inversión es en sentido de la estructura cristalina.

Por su parte, la magnetita puede producirse ya sea por oxidación deutérica, serpentización de silicatos que contienen hierro en fase no magnética, alteración de arcillas no magnéticas, o precipitación a partir de soluciones que contienen hierro. Además, puede cambiar de maghemita a una solución sólida maghemita-magnetita que puede invertirse a un intercrecimiento de hematita-magnetita. La dinámica inter e intra atómica sumada al contenido en compuestos de óxidos de hierro conforman el mecanismo que otorga la capacidad de las rocas para adquirir una remanencia magnética, abriendo un gran abanico de estudios a partir de estos minerales magnéticos contenedores de hierro, particularmente magnetita, maghemita, hematita (óxidos de hierro); oxihidróxidos de Fe, como goethita y ferrihidrita, o los sulfuros de hierro como greigita y pirrotita.

### **Propiedades magnéticas de los minerales**

Las propiedades magnéticas de las rocas hacen referencia al comportamiento magnético de ciertos minerales en su estructura atómica. Igualmente, se asocian a la configuración atómica y electrónica de los elementos conformantes de estos minerales.

La dinámica de las interacciones entre los momentos magnéticos atómicos son los que determinan cómo será el comportamiento magnético de un material, y debido a que el arreglo atómico es distinto según el tipo de elemento, así como las interacciones atómicas que lo conforman, cada material *per sé* tendrá un comportamiento magnético distinto a partir de su constitución atómica (para una discusión más profunda revisar el trabajo de Dunlop & Özdemir, 2007).

Este comportamiento magnético se clasifica en función de la respuesta de un material a la presencia de un campo magnético y en general se destacan tres tipos distintos: diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo; no obstante, de este último se derivan dos comportamientos adicionales, antiferromagnetismo y ferrimagnetismo.

En síntesis, estos comportamientos magnéticos son:

*Diamagnetismo:*

Propiedad de todos los átomos. Este tipo de materiales no posee momentos magnéticos, por lo tanto, la dirección que adquiere durante su magnetización ( $M$ ) es opuesta a la del campo magnético aplicado ( $H$ ). Esto deriva en una susceptibilidad negativa y es independiente a efectos por temperatura. Minerales como el cuarzo o la calcita pertenecen a este comportamiento.

*Paramagnetismo:*

Sus momentos magnéticos pueden alinearse de manera paralela a la dirección del campo aplicado, es decir, las direcciones de ambas partes coinciden en el sentido de su dirección. Cuando el campo aplicado es removido, la magnetización es cero. Este tipo de materiales tiene dependencia al campo aplicado, así como a la temperatura pues los efectos del campo están en función del desorden atómico impuesto por el aumento de temperatura. Minerales como el anfíbol o el piroxeno pertenecen a este comportamiento.

*Ferromagnetismo:*

Estos materiales como el hierro, el níquel o el cobalto pueden retener una magnetización remanente o remanencia ( $M_r$ ) en ausencia de un campo ( $H$ ).

- *Ferrimagnetismo:* Este comportamiento magnético guarda similitudes con las interacciones atómicas presentadas en el ferromagnetismo. El tipo y número de cationes en la estructura cristalina producen momentos magnéticos de diferente magnitud, pero dirección opuesta (antiparalelos), generando una magnetización neta y menor a los materiales ferromagnéticos. Minerales como la magnetita pertenecen a este comportamiento.
- *Antiferromagnetismo:* De igual modo, es similar en comportamiento a los materiales ferrimagnéticos, sin embargo, no poseen magnetización espontánea, de manera que sus momentos magnéticos, aunque no estén paralelos se compensan mutuamente a partir de sus redes cristalinas, como es el caso del espín cantedo en el comportamiento de la hematita.

### *Magnetización Remanente Natural (NRM)*

Durante los procesos geológicos de la formación de las rocas el campo geomagnético es registrado por todos los minerales magnéticos por diversos modos de adquisición de la remanencia, normalmente al formarse y posteriormente durante su evolución en el tiempo. La remanencia resultante es la suma de todas las magnetizaciones registradas, llamada magnetización remanente natural.

La NRM se debe a la primera medición en laboratorio de la magnetización de una roca. Regularmente, la NRM es la combinación de varias componentes vectoriales que contribuyen con diferentes historias de registro. En estos casos, la componente adquirida durante el proceso de formación de una roca se denomina componente primaria, y secundarias a todas las demás que fueron adquiridas en eventos posteriores a la formación de la roca. Los tres tipos de NRM primaria son: magnetización termoremanente (TRM), magnetización remanente química y magnetización remanente detrítica (Butler, 1998).

### *Susceptibilidad magnética inicial con relación al volumen (k)*

También conocida como susceptibilidad magnética de campo bajo, a nivel atómico, (k) es la respuesta medida de las interacciones entre orbitales y/o espines, debida a un campo magnético inducido o aplicado.

Dentro de la matriz rocosa que compone una muestra se definen distintas contribuciones en función del comportamiento magnético, por ejemplo, la respuesta diamagnética es muy pobre (asociada a una dinámica de orbitales) a comparación de la contribución paramagnético o ferromagnética. Para el caso del tipo de rocas trabajadas en este estudio (obsidiana), la influencia de los minerales diamagnéticos es despreciable. Por su parte, la respuesta paramagnética, es más fuerte. Pero, en el caso de los minerales ferromagnéticos, aunque sea una cantidad mínima (< 5%), éstas dominaran la respuesta 'bulk' o general de la muestra. Usualmente, la letra *k* se interpreta como un acercamiento o proxy para determinar la concentración de material magnético en una muestra. A reserva de factores como la gran variación de tamaños de partícula magnética o múltiples fases magnéticas dentro de la muestra, este parámetro puede usarse con precaución para realizar algunos cálculos complementarios, por ejemplo, para obtener la razón de Koenigsberger.

En adición, en magnetismo de rocas, para reportar los resultados experimentales de susceptibilidad magnética en función de la temperatura, es usual referirse a esta susceptibilidad medida con la letra *K*, por lo que, en adelante, la letra ***k*** hará referencia únicamente a susceptibilidad inicial y, por otro lado, "*K*" será utilizada para referirse a los experimentos con variación de temperatura o (K-T).

### *Razón de Koenigsberger (Q)*

La razón Koenigsberger (Q) es una aproximación cuantitativa de la magnetización remanente racionalizada con respecto a la magnetización inducida (susceptibilidad magnética por un campo aplicado). Se calcula de la siguiente forma:

$$Q = \frac{NRM}{\chi H} \quad (6)$$

donde NRM es la intensidad de magnetización remanente natural,  $\chi$  corresponde a la susceptibilidad magnética inicial a temperatura constante y H es el campo geomagnético presente en el área de estudio (Ver tabla 4 de material suplementario). Para la obtención de la magnetización inducida es necesario medir el valor de la susceptibilidad magnética inicial de cada espécimen, así como obtener el valor medio del campo magnético en el área de estudio (por ejemplo, al usar el *Magnetic Field Calculator* del *National Oceanic and Atmospheric Administration*).

Este parámetro puede utilizarse como un primer acercamiento a la procedencia de la magnetización contenida en las rocas (anomalías magnéticas) así como para estimar la eficacia en los mecanismos de adquisición de la NRM con base en la relación de magnetización inducida (implícita dentro de la definición de susceptibilidad) y magnetización remanente. Además, Q establece una relación directa con procesos asociados a fenómenos de exsolución entre minerales magnéticos a partir de cuantificar una diferencia entre rocas pobre o fuertemente magnetizadas (Alva-Valdivia y Urrutia-Fucugauchi, 1998). De esta manera, los valores de Q (establecidos a partir de la ec.1, Stacey, 1967) se pueden utilizar para aproximar la estabilidad sobre el origen de la termoremanencia en la NRM.

### *Magnetismo Termoremanente (TRM)*

Una de las tres formas básicas de NRM primaria (la remanencia es adquirida durante la formación de una roca) es la magnetización termoremanente, que está asociada a la formación de las obsidias, pues la remanencia es adquirida durante el enfriamiento a alta temperatura: la NRM se registra durante el enfriamiento del material ígneo, siempre por encima de la temperatura de Curie y en presencia de un campo magnético (Butler, 1998).

### *Susceptibilidad en función de la temperatura (K-T)*

Se analizan curvas de comportamiento asociadas a la respuesta de un material en función de la variación progresiva de alta y baja temperatura. Son un gran complemento al momento de determinar el estado físico y magnético de la mineralogía magnética contenida en las rocas. De este proceso, se deja de lado la contribución diamagnética pues su

susceptibilidad magnética es negativa e independiente a la temperatura; la paramagnética es inversamente proporcional a la temperatura, por tanto, ambas son ignoradas en este trabajo.

Someter la muestra a diferentes rangos de temperatura permite dilucidar algunos parámetros asociados directamente con la mineralogía magnética. Estas mediciones proporcionan la caracterización de las fases magnéticas contenidas en la muestra. A partir de la identificación de las temperaturas de Curie (o Néel, sea un mineral antiferromagnético como la hematita), expresadas gráficamente como cambios abruptos de la trayectoria de la susceptibilidad, se pueden asociar a cambios en el comportamiento magnético, así como de la estructura atómica del mineral, también denominadas transiciones, como la de Verwey y Morin, para detectar magnetita o hematita, respectivamente.

Pensando en la magnetita, como el mineral magnético más abundante en las rocas volcánicas, la Temperatura de Curie ( $T_C$ ) es de  $580^\circ\text{C}$ . Por otro lado, debajo de los  $-153^\circ\text{C}$  ó  $120^\circ\text{K}$  (temperatura de Verwey), el arreglo catiónico del mineral es distorsionado de tal manera que el arreglo cúbico inicial cambia a uno monoclinico simétrico, afectando principalmente este fenómeno en la remanencia de partículas SD (Dunlop y Özdemir, 2015). Para el caso de la titanomagnetita con alto contenido en titanio (~60%), las  $T_C$  van entre  $120$  y  $150^\circ\text{C}$ , siendo minerales causantes de fuentes magnéticas efectivas y características de ambientes corticales más superficiales como en las cortezas oceánicas.

La hematita, producto totalmente oxidado de la magnetita, posee un valor  $T_C$  de temperatura más elevado, aproximadamente de  $675^\circ\text{C}$  por lo que, al igual que la magnetita, son minerales con alta estabilidad térmica. Como su homólogo menos oxidado, posee una transición catiónica influida por temperatura baja; aproximadamente a los  $-10^\circ\text{C}$  ó  $260^\circ\text{K}$  (transición de Morin), en que los espines constituyentes de sus redes cristalinas giran libremente, cambiando la simetría cristalina y repercutiendo en un descenso de la susceptibilidad magnética expresado gráficamente como un cambio repentino de pendiente.

#### *Temperaturas de Curie $T_C$*

La temperatura de Curie ( $T_C$ ) es un parámetro derivado de las curvas de susceptibilidad magnética vs. temperatura (K-T), que, a través del calentamiento continuo de la muestra, el comportamiento del mineral magnético que posee una remanencia (material ferrimagnético) alcanza la temperatura o punto de Curie, al desaparecer la remanencia; esto es, el material cambia a un comportamiento paramagnético.

*Estados de dominio magnético: SD, MD, PSD/Vortex*

En partículas muy pequeñas (100 nm), para el caso de magnetita, el fenómeno de intercambio de acoplamiento mantiene uniformemente una magnetización a lo largo de todo el cristal, por billones de años (Néel, 1949, 1955). Tales partículas son asociadas a contenido de *dominio magnético sencillo*. Conforme el tamaño aumenta, los tipos de energía implicados en la interacción estructura cristalina-magnetización, tienden a disminuir y con esto, comienzan a dividir el cristal en dos o más regiones o dominios magnéticos (Dunlop y Özdemir, 2015; Roberts et al., 2017) y con esto, la capacidad de retener una señal magnética por mucho tiempo es disminuida. Teóricamente, las partículas SD están magnetizadas de manera uniforme, cuando ocurren dentro de un rango límite de dimensiones, poseen estabilidad térmica y pueden retener el registro de un campo magnético. En el caso de los estados MD, el momento magnético por unidad de volumen es mucho menor que las partículas SD ya que los momentos magnéticos se cancelan entre sí (Roberts et al., 2017).

Stacey (1961, 1962) propone el término *Pseudo-single domain* (PSD) para describir un estado magnético de transición entre dominio sencillo estable (SD) y estado multidominio (MD). No obstante, en lugar de observar una clara transición entre estados SD y MD que reflejan constantemente un contraste marcado en las propiedades magnéticas, ocurre en su lugar una transición gradual a partir del límite de estabilidad de un comportamiento SD. El rango de tamaño de partícula sobre el que ocurre tal transición depende de la magnetización espontánea, forma, y estado de esfuerzos internos de una partícula (e.g., Day et al., 1977; Dunlop y Özdemir, 1997), además de que el comportamiento paleomagnético es preservado a lo largo de rangos de tamaños de partículas magnéticas por encima del estrecho umbral de tamaño SD teórico en magnetita (20-75 nm) (Roberts et al., 2017) y, por lo tanto, se considera que mucho del registro paleomagnético está contenido en mayor medida, por partículas PSD en lugar de SD estables.

Es así que el término PSD se ha posicionado como la explicación dominante sobre la magnetización de un material asociado con la mayor fracción de partículas que poseen remanencia a través del tiempo geológico. En 2017, Roberts et al, sugieren que el concepto de PSD no describe los procesos físicos relevantes para entender la magnetización de un material geológico. Es decir, ciertas características atribuidas al comportamiento PSD se pueden explicar, en su lugar, por procesos como por ejemplo, nucleación de un vórtice magnético sencillo, cuyas dimensiones sólo son someramente superiores al tamaño máximo en que una partícula SD estable puede ocurrir. Conforme el tamaño de esta

partícula aumenta, pueden desarrollarse diversas estructuras como lo son los vórtices múltiples, anti vórtices así como nucleación de muros de dominio, produciendo diversas formas en las que los momentos magnéticos se cancelan, a la par de una transición gradual hacia un estado magnético MD (Roberts et al., 2017).

*Ciclos de histéresis y curvas de adquisición de magnetismo remanente isoterma (IRM)*

Estos ciclos se expresan gráficamente a partir de una curva que relaciona una respuesta entre la magnetización inducida respecto a la aplicación de campos magnéticos que van aumentando progresivamente a temperatura constante (ambiente). El principio rector del ciclo de histéresis magnética es analizar la respuesta sobre la magnetización de las rocas a partir de la aplicación de un campo magnético externo, primero en una dirección y después en una contraria (de signo negativo por convención) hasta completar el ciclo. La forma de estos ciclos es característica de materiales ferromagnéticos y debido a que los otros dos tipos de materiales (diamagnéticos y paramagnéticos) presentan una forma próxima a una línea recta (proceso reversible) y sólo se presentan en campos muy bajos, no se describen en este apartado.

La construcción de la curva inicia aplicando un campo que se va incrementando hasta que la magnetización inducida de la muestra alcanza el punto de saturación ( $M_S$ ) siendo el máximo de momento magnético inducido; más allá de este máximo de saturación, ésta ya no incrementa, aunque el campo aplicado siga aumentando (Moskowitz, 2015). El siguiente paso es reducir el campo aplicado a cero. Cuando esto ocurre, la magnetización no regresa al punto cero, sino que persiste un valor de magnetización, llamado remanente o remanencia de saturación ( $M_{rS}$ ). Después, se vuelve a aplicar de nueva cuenta un campo, aplicado en dirección contraria o campo negativo y cuando la magnetización inducida es cero, el valor del campo se conoce como fuerza de coercitividad o coercitividad ( $H_C$ ) (Moskowitz, 2015). A partir de los parámetros comentados, una vez finalizado el ciclo obtenemos los valores de magnetización remanente ( $M_S$ ); magnetización remanente ( $M_{rS}$ ); y la coercitividad ( $H_C$ ), luego de hacer la corrección por contribución paramagnética.

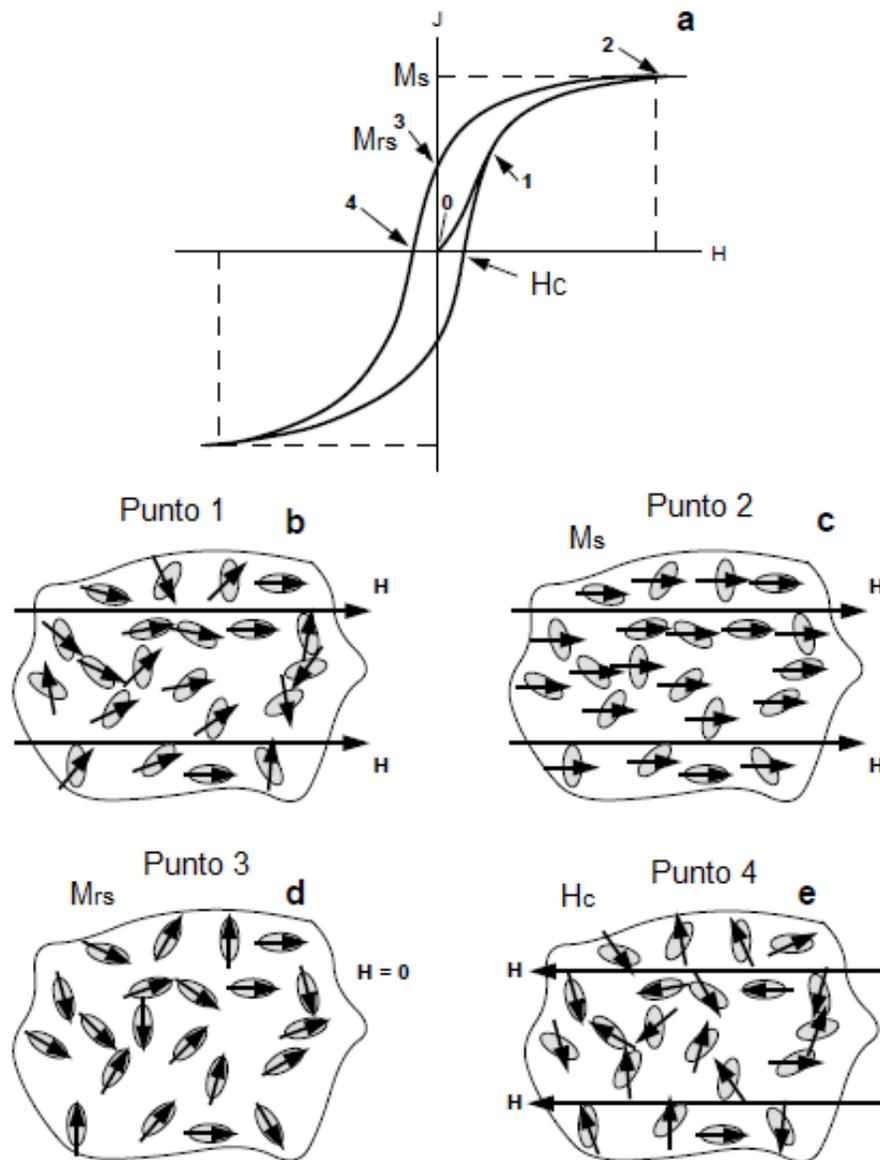


Figura 4. Ciclo de histéresis de una muestra sintética con 5% de volumen de partículas de magnetita SD elongadas. La saturación de magnetización es  $M_s$ ; la remanencia de saturación es  $M_{rs}$ ; la coercitividad es  $H_c$ .

Las curvas IRM (Isothermal Remanent Magnetization) se obtienen realizando una medición a partir de un estado desmagnetizado. El incremento de campos magnéticos es aplicado para adquirir el espectro de IRM, medido de modo cuasi-continuo, i.e., la muestra se expone por lapsos de tiempo breve a campos magnéticos altos crecientes, y bajo una temperatura constante (i.e., isotermal).

Al constituir en una roca con una matriz de distintos minerales magnéticos con distintas distribuciones de tamaño, las curvas de adquisición IRM resulta en información sustancial

sobre el número de componentes presentes asociadas directamente con sus rangos de coercitividad (e.g., Dunlop, 1972).

#### *Curvas de desmagnetización de corriente continua (Backfield)*

Referidas comúnmente como *curvas backfield*, se utilizan para determinar la coercitividad de remanencia ( $B_{cr}$ ) de una muestra y de manera más general, para caracterizar el espectro de coercitividad. Luego de adquirir una remanencia de saturación, la muestra es desmagnetizada progresivamente aplicando un campo negativo, siendo ese valor de campo la coercitividad de remanencia.

#### *Cuantificación de la forma de ciclo de histéresis*

Las distintas formas de las curvas de histéresis suelen ser interpretadas de manera cualitativa a partir de la inferencia sobre el contenido de partículas SP o, de manera más general, mezclas de fracciones con coercitividades altamente contrastantes. Para lograr una mayor interpretación cuantitativa en las posibles combinaciones de fracciones minerales y sus dominios magnéticos, Fabian (2003) propone, entre otros, el parámetro de forma o “sigma”. Este parámetro busca obtener una medición lineal de la variación de forma “potbellied” a “wasp-waisted” y puede ser directamente calculado a partir de mediciones convencionales del ciclo de histéresis y la curva ‘backfield’. De tal manera que si el parámetro sigma es mayor que cero, el ciclo de histéresis estará asociado a un comportamiento wasp-waisted; cuando sigma resulta menor que cero o de valor negativo, el ciclo estará asociado a una forma potbellied (Fabian, 2003).

#### *Curvas Inversas de Primer Orden, FORC (por sus siglas en Inglés)*

La aplicación de este método en el ámbito paleomagnético deriva de la búsqueda de una herramienta con mayor capacidad de análisis con respecto a la mineralogía magnética y procesos internos de las partículas magnéticas. En este sentido, el ciclo de histéresis queda limitado ya que no es capaz de diseccionar entre combinaciones minerales inherentes a muestras naturales como lo son el tamaño de partícula magnética (o grano) y/o interacciones entre partículas magnéticas, por lo que el advenimiento de los diagramas FORC busca establecer un método donde la discriminación tanto de estado de dominio como de mineral magnético sea posible, entre otros elementos.

Por lo tanto, FORCs son una herramienta adicional que deriva del principio metodológico del ciclo de histéresis: una curva FORC se construye tomando el espectro

formado por éste como el área de muestreo a partir del que se tomará sus datos, no obstante, también tiene un método de medición particular.

La genealogía teórica de este proceso da inicio con los trabajos de Preisach (1930) y Néel (1954), posteriormente, el desarrollo más reciente de la técnica se asocia a Hejda & Zelinka (1990) mientras que Pike *et al.*, (1999) y Roberts *et al.*, (2000), presentan el método a la comunidad de magnetismo de rocas. A partir de los primeros años de este siglo, conforme el desarrollo tecnológico y teórico lo permiten, la aplicación de los diagramas FORC en el ámbito paleomagnético se diversifica y toma una importancia mayor de manera gradual, como se verá en adelante con los diversos trabajos citados.

La medición de una FORC implica pensar, a su vez, en un conjunto de FORCs (i.e., curvas de histéresis con algunas diferencias), tantas como el equipo de medición lo permita. Esto proporciona información a detalle acerca del interior de un ciclo de histéresis normal, permitiendo la determinación de fenómenos tales como campos de interacción para todas las partículas que contribuyen al ciclo histerético (Muxworthy & Roberts, 2007). En sentido práctico, la medición consiste en someter una muestra a un campo inducido hasta obtener un campo de saturación, lo que implica que la intensidad del campo va en aumento. Luego de conseguir la saturación, se disminuye el campo a algún valor  $H_a$ . A partir de este punto, se invierte el campo aplicado y se continúa incrementando hasta adquirir nuevamente una saturación (ver figura 5A). Esto se realiza en series de pasos regulares ( $H_b$ ), esto es, se va a repetir varias veces para distintos valores de  $H_a$  hasta la obtención de un conjunto de FORCs (figura 5B). Es un proceso similar al ciclo de histéresis. La magnetización medida en cada paso está en función de  $H_a$  y  $H_b$  dando una matriz de valores  $M(H_a, H_b)$  que son graficados en un espacio de campo donde se aprecia un conjunto mallado y un sistema coordinado con diferente nomenclatura (figura 5C), para más detalle ver el trabajo de Harrison & Feinberg (2008).

La presentación final de un diagrama FORC posee un cambio en la notación de los ejes representando otro eje coordinado con una rotación (i.e.  $H_U$  y  $H_C$ ); este sistema cubre el área  $H_a - H_b$  definida como el rectángulo rosa en la figura 5C. Sucesivamente, la distribución FORC se define como la segunda derivada mezclada de la superficie de dicho mallado

$$\rho(H_a, H_b) = - \frac{\partial^2 M(H_a, H_b)}{\partial H_a \partial H_b} \quad (7)$$

Algunas de las aplicaciones que se han desarrollado a partir de esta herramienta versan sobre la detección de estados de dominios magnéticos (Zhao *et al.*, 2017); presencia de interacciones magnetostáticas entre partículas (Roberts *et al.*, 2000, 2014; Pike *et al.*, 1999; Dumas *et al.*, 2007a; Dumas *et al.*, 2007b; Egli *et al.*, 2010); preselección de muestras para estudios de paleointensidad (Wehland *et al.*, 2005; Carvallo *et al.*, 2006), etc. Además, de manera más reciente, se ha iniciado un amplio campo de discusión sobre el potencial de identificación y separación (Unmixing) de componente magnéticas dentro de muestras individuales con base en las FORC, junto con la combinación de análisis por componentes principales (PCA) (Muxworthy *et al.*, 2005; Lascu *et al.*, 2015; Harrison *et al.*, 2018).

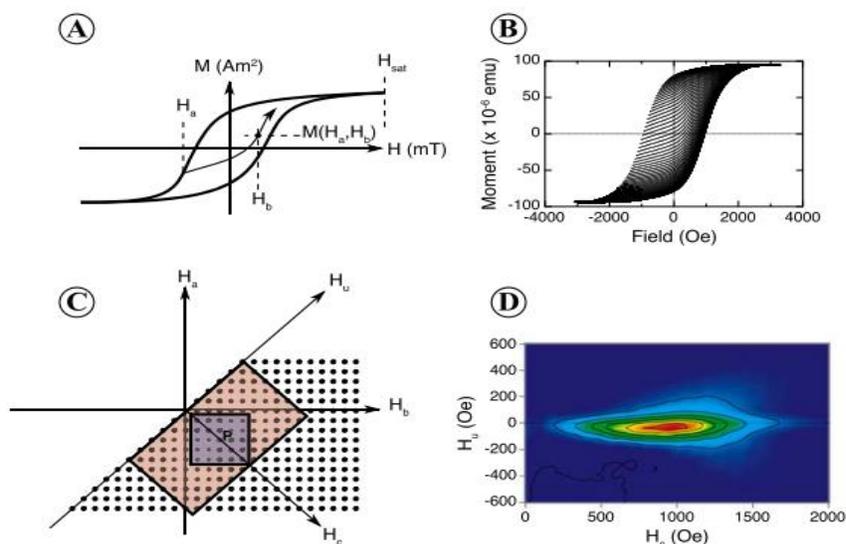


Figura 5. Construcción de una curva inversa de primer orden (siglas en inglés FORC). (A) Definición y bosquejo gráfico de medición. (B) Conjuntos de FORCs. Ejemplo ilustrativo (Feinberg *et al.* [2005]). (C) Matriz de valores  $H_a$  y  $H_b$  utilizados para medir magnetización durante un proceso de medición de FORC. El recuadro azul representa la región de  $H_a - H_b$  posterior al tratamiento con FORCin. (D) Diagrama FORC final generado a partir de las curvas en (B). Modificado de (Harrison & Feinberg, 2008).

#### Curvas de Desmezcla (Unmix)

El problema a resolver por parte del proceso Unmix da inicio con las curvas de magnetización, descompuestas en componentes desconocidas que no presentan un comportamiento lineal y poseen soluciones múltiples, cuyo comportamiento es inherente a materiales geológicos y arqueológicos. Por lo tanto, la utilización de este método se acompaña usualmente de alguna conjetura inicial acerca del contexto geológico, así como de la historia geoquímica del material (Egli, 2004a; Egli, 2004b). De tal forma que el proceso de Unmixing o “separación de mezclas magnéticas” es una herramienta que ayuda a analizar las posibles distribuciones de coercitividad presentes en una muestra a partir de sus curvas de IRM o ARM (Egli, 2005). Tales distribuciones se pueden considerar como

variaciones estadísticas en los cambios de campos magnéticos aplicados o el incremento progresivo de un campo inducido. Para sustentar esta consideración, se aproximan estas curvas de manera proporcional a las funciones densidad de probabilidad (PDF, por el acrónimo en inglés). La bondad que implica el uso de las PDF radica en la posibilidad de poder ser representada en diferentes escalas, es por esto que en el caso de las distribuciones de coercitividad se pueden re-escalar en términos de un campo magnético ya sea con escala logarítmica, exponencial o lineal (Egli, 2005).

La interpretación del Unmix se fundamenta en el uso de curvas de magnetización remanente isotermal (o IRM) pues este parámetro se analiza en términos de la mineralogía del material. Las curvas de magnetización son descompuestas en un conjunto de contribuciones individuales. A cada contribución se le llama *componente magnética*, a la que se le es asociada un conjunto específico de partículas magnéticas con distribución unimodal, así como propiedades fisicoquímicas.

De esta manera, Egli (2005), apunta que una distribución de coercitividad relacionada con un conjunto de partículas magnéticas depende de: (1) la distribución estadística de las micro-coercitividades; (2) la distribución de coercitividad de todos los granos con la misma micro-coercitividad; y (3) las interacciones magnetostáticas entre las partículas adyacentes. En conjunto con lo anterior, Maxbauer *et al.* (2016), adicionan curvas gaussianas con sesgo estadístico (SGG) para un modelo más aproximado a muestras naturales. Derivado de lo anterior, se puede decir entonces que los parámetros de interpretación tienen la intención de dilucidar la mineralogía magnética, así como el estado de dominio de las partículas magnéticas contenidas en los materiales a analizar.

## **METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS MAGNÉTICO EN LABORATORIO**

Previo al desarrollo descriptivo de la metodología realizada, es menester destacar que la mayoría de las muestras procesadas y analizadas en este trabajo fueron colectadas en campo por el Dr. Guillermo Acosta y el Maestro Víctor García (IIA, UNAM), con un objetivo de estudio principalmente arqueológico. Es decir, de inicio gran parte del muestreo realizado fue pensado de forma distinta a los términos de metodologías tanto paleomagnética como de magnetismo de rocas, de acuerdo a algún objetivo dentro de las Ciencias de la Tierra.

### *Antecedentes*

La primera etapa del trabajo consistió en una revisión de las investigaciones que implicaran el magnetismo de rocas asociado a las obsidias con el interés de conocer el estado del arte en esta rama del magnetismo, además de realizar comparaciones y enriquecer los resultados de propiedades magnéticas en este estudio. A partir de la revisión bibliográfica, los trabajos realizados hasta el momento se agrupan en función de propósitos comunes: (1) estudios realizados en muestras de obsidiana arqueológica (e.g., Urrutia-Fucugauchi, 1999); (2) estudios realizados en obsidias geológicas y/o arqueológicas (e.g., Church & Caraveo, 1996; McDougall, 1983; Frahm & Feinberg, 2013; Vidal-Solano *et al.*, 2020, entre otros); e (3) investigaciones que profundizan en detalles acerca de los distintos sitios donde fueron recolectadas las muestras de obsidias (ver capítulo 3).

### *Selección y preparación de las muestras*

La segunda fase de este trabajo consistió en la preparación de muestras para poder realizar los experimentos en el Laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Dichos experimentos se realizaron en distintos equipos del laboratorio, cada uno se asocia a principios físicos distintos según el objetivo perseguido, como se observa en la tabla 1.

*Tabla 1. Experimentos realizados, nombre del equipo y preparación de la muestra.*

Nombre del experimento	Equipo	Tipo de muestra
<i>Susceptibilidad magnética inicial</i>	<i>Susceptómetro KLY-2 Kappabridge</i>	<i>Fragmento 10-15 mg</i>
<i>Magnetización remanente natural (NRM)</i>	<i>Magnetómetro de giro JR6</i>	<i>Fragmento de roca con un peso de 10-15 mg</i>
<i>Ciclo de histéresis y curvas de adquisición IRM</i>	<i>Micromag AGM (Alternating Gradient Magnetometer)</i>	<i>Fragmento de roca con un volumen &lt; 0.4 mm y peso promedio de 30 mg.</i>
<i>Diagramas de curvas inversas de primer orden (FORC)</i>	<i>Micromag AGM (Alternating Gradient Magnetometer)</i>	<i>Fragmento de roca con un volumen &lt; 0.4 mm y peso promedio de 30 mg.</i>
<i>Curvas de Susceptibilidad vs. Temperatura (K-T)</i>	<i>Susceptómetro Multi Funcional Kappabridge (MFK-FA)</i>	<i>Fragmento pulverizado de 100 a 150 mg con un tamaño de grano fino</i>

#### *Obtención de muestras en Sierra de las Navajas, Hidalgo*

Para cada sitio se tomaron fragmentos de distintos tamaños para realizar los experimentos magnéticos. En la tabla anterior se definen algunas características físicas de los fragmentos como tamaño, peso y volumen aproximados, según los requerimientos técnicos necesarios para cada uno de los equipos.

#### **Análisis de Laboratorio**

##### *Determinación de mineralogía magnética*

Para entender el significado del registro magnético de las obsidianas, es necesario determinar la composición y características de la mineralogía magnética. Con esta idea se establecen cuáles serán los experimentos para conocer las distintas propiedades de la mineralogía magnética, revelando así los minerales portadores del magnetismo remanente correspondiente al momento de la formación de las obsidianas, particularmente considerando que estos materiales son de enfriamiento rápido.

### *Criterios de Selección*

A partir de la obtención de la magnetización remanente natural (NRM) junto con la susceptibilidad magnética inicial de cada espécimen (y los gráficos NRM vs  $k$ ), se seleccionaron muestras representativas de cada agrupamiento para algunos experimentos tales como: curvas de histéresis, magnetización remanente isotermal (IRM), análisis de FORC, y curvas K-T; Los especímenes que resultaron en una mayor NRM así como mayores valores de susceptibilidad magnética fueron seleccionados. Estos experimentos en conjunto, conducen a la identificación de los minerales magnéticos.

### *NRM y Susceptibilidad inicial*

La NRM es la magnetización de cada muestra antes de aplicar algún proceso físico y/o químico, es una aproximación cuantitativa del registro (remanencia) magnético desde el momento de formación de la roca. Puesto que se trata de fragmentos de obsidiana no-orientados, solo es posible recuperar la intensidad de magnetización. La medición de la NRM se realiza con un magnetómetro de giro JR6 (de AGICO), ubicado dentro de una jaula de Faraday que tiene el objetivo de minimizar cualquier influencia magnética externa. Debido a que los fragmentos trabajados no poseen forma geométrica se ajustaron con algodón dentro de un porta-muestras cúbico. De esta manera se obtuvieron los valores de NRM para cada uno de los 20 especímenes por cada sitio de obsidiana.

En el caso de la susceptibilidad magnética inicial ( $k$ ), ésta es obtenida a partir del uso del susceptibilímetro KLY-2 Kappabridge (de AGICO).

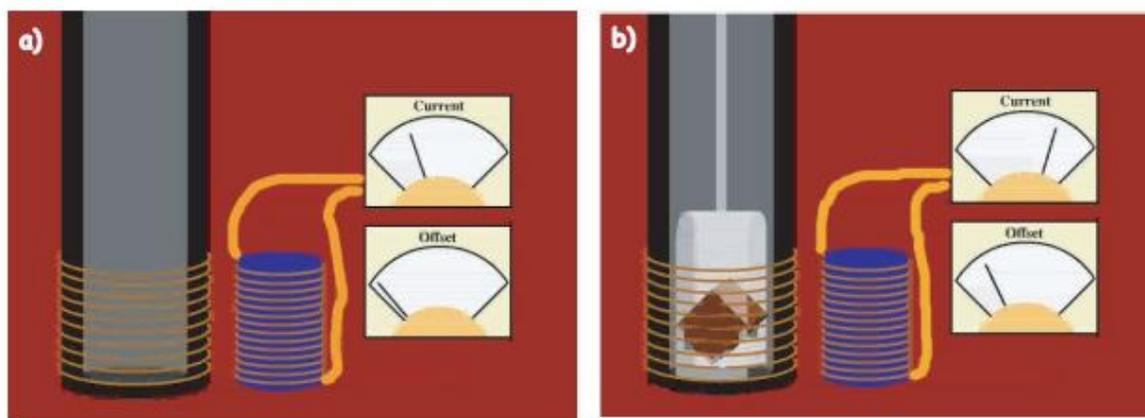


Figura 6. Medición de susceptibilidad magnética. a) La bobina (cilindro azul) induce una corriente. Eso genera una magnetización en la muestra (cubo café) en b) que desplaza la flecha de corriente (current). El desplazamiento es proporcional a la susceptibilidad magnética del espécimen (Modificado de Tauxe *et al.*, 2010).

Dicho instrumento funciona de la siguiente manera: una corriente alterna es conducida a través de una bobina (figura 5a), induciendo una corriente en la bobina del lado derecho. Esta corriente genera un pequeño campo, usualmente menor a 1 mT a lo largo del eje de la bobina. Al montar una muestra (figura 5b) la corriente alternada induce un campo magnético en el espécimen causando un desplazamiento en la corriente (flecha del lector del equipo en “current”, lado derecho figura 5b) por medio de la bobina, que es proporcional a la inducción magnética; tras la calibración se puede tomar dicha cantidad como la susceptibilidad magnética inicial (Tauxe *et al.*, 2010).

#### *Susceptibilidad dependiente a la temperatura*

En este trabajo se han generado 18 curvas K-T para determinar la mineralogía magnética contenida en los distintos yacimientos de obsidiana. Las curvas de susceptibilidad en función de la temperatura (K-T) esbozan de manera gráfica la dependencia de la susceptibilidad magnética durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de la muestra. El punto de Curie (ver capítulo 4) es obtenido de la siguiente manera: Utilizando un susceptibilímetro Kappabridge MFK-FA (de AGICO) con un horno CS4 para alta temperatura (0°-680°C), diseñado para medir variaciones de temperatura de susceptibilidad magnética en campo-bajo de minerales magnéticos. De manera similar, se utilizó un criostato CS-L (baja temperatura) con las mismas intenciones de medición en rangos de temperatura inicial de -192°C hasta temperatura ambiente (estándar del equipo a 20°C). Para más detalle se recomienda visitar <https://www.agico.com/text/products/mfk1/mfk1.php>. Ambos dispositivos están conectados a una matriz digital compuesta de un equipo de cómputo tipo laptop desde donde se programa la rutina de medición para ambos escenarios de variación térmica a través del software *sufyte5*.

El tratamiento para procesar los datos obtenidos se llevó a cabo con el software *Cureval* (de AGICO) obteniendo las curvas de susceptibilidad magnética en función de alta y baja temperatura. Las temperaturas o puntos de Curie se calcularon por medio del método diferencial de Tauxe (1998), donde se busca la máxima curvatura en la curva K-T calculando la primera y segunda derivada del conjunto de datos de dicha curva; el punto máximo de la curva obtenida tras la segunda diferencial es el estimado de la  $T_C$ . Este proceso se realizó con el paquete de rutinas *PmagPy* en Python (Tauxe *et al.*, 2010).

### *Histéresis e IRM*

La información proporcionada por los experimentos de histéresis engloba la respuesta magnética contenida en la muestra, o *bulk*. En otras palabras, se obtienen datos asociados al comportamiento tanto de minerales de importancia paleomagnética como mineralogía diamagnética y/o paramagnética

Una roca es un agregado de minerales, en la que, los ciclos de histéresis representan una herramienta altamente sensible para conocer la mineralogía y los tipos de partículas magnéticas, además de su forma y configuración atómica (anisotropía uniaxial e interacciones de partículas, respectivamente; entre otros). La interpretación de este tipo de gráficos se complica pues suelen presentar formas diversas, al existir diferentes posibilidades de respuesta para un material magnético. Los dos tipos principales de formas en ciclos de histéresis detectadas y con un amplio marco teórico asociado a muestras naturales son las llamadas “wasp-waisted” o cintura de avispa y “pot-belly” o barrigona. Algunas referencias de estos comportamientos, así como una discusión más a fondo, se pueden ver en los trabajos de Tauxe *et al.*, 1996, 2010; Pick & Tauxe, 1994; y Bennett and Della Torre, 2005.

Con estos experimentos, se obtienen parámetros como lo son la fuerza de coercitividad ( $H_c$ ), remanencia de coercitividad ( $H_{cr}$ ), saturación de magnetización ( $M_s$ ) y remanencia de saturación ( $M_{rs}$ ) utilizados para sustraer comportamientos de los minerales que podrían contener remanencia magnética.

El fenómeno de histéresis proporciona una primera aproximación a la configuración de minerales magnéticos. Para realizar las mediciones, se utilizó un Micromag AGFM 2900 (Alternating Gradient Force Magnetometer) trabajando a temperatura ambiente con un campo máximo de aplicación de 1.2 T. Los datos se representan en un gráfico de magnetización inducida en función de un campo magnético aplicado, donde este campo varía en magnitud y dirección de manera cíclica. Por su lado, el experimento IRM (ver capítulo 4), ayuda a discernir entre cada contribución de minerales magnéticos contenidos dentro de la muestra. Para la obtención de los gráficos correspondientes de IRM, se trabajó con el programa de cómputo del mismo magnetómetro, llamado *MicroMagAGM*. A través de este, se obtuvieron los parámetros magnéticos que complementan los conseguidos por medio del software HystLab. El software *Hystlab* es el acrónimo en inglés que designa a un programa utilizado para procesar y analizar curvas de histéresis (Paterson *et al.*, 2018). Construido para ser utilizado a través de Matlab, la interfaz es muy amigable para los

usuarios además de proporcionar la posibilidad de visualizar el tratamiento de los datos cuantitativa y cualitativamente.

En este trabajo, cada uno de los datos procedentes del AGM Micromag se trabajó por medio de HystLab, realizando la corrección lineal de campo alto así como la de pendiente por medio del contenido paramagnético, además, cada una de las muestras se corrigió según su masa específica. De manera primordial, el HystLab corrige los errores sucedidos durante la medición-adquisición de la curva de histéresis (Paterson *et al.*, 2018).

Para una revisión teórica en forma y mayor detalle del funcionamiento del programa así como la descarga gratuita se recomienda visitar <https://github.com/greigpaterson/HystLab> (Paterson *et al.*, 2018).

### *FORC*

Los diagramas FORC establecen una aproximación más detallada para caracterizar de mejor manera distintos tipos de rocas con una combinación de distintos materiales magnéticos derivados de procesos naturales. En este sentido, los diagramas FORC permiten establecer los estados de dominio magnético, factor primordial que es altamente sensible al tipo de partícula y, por tanto, a sus propiedades magnéticas.

A partir de los experimentos de histéresis y de las curvas FORC, el análisis y determinación de la mineralogía que porta una remanencia puede realizarse con mayor detalle y el diagnóstico de estados de dominio que dictan el comportamiento magnético (SD, PSD o vortex y MD) se realiza de manera óptima y refina las posibilidades múltiples de los estudios magnéticos.

Para obtener los gráficos de FORC y dilucidar con mayor detalle los procesos internos de las muestras trabajadas, se utilizó el programa FORCinel versión 3.0 (Harrison y Feinberg, 2008). Este programa, al igual que HystLab, CODICA, MaxUnmix (ver siguiente página) y Pymagpy, están diseñados para funcionar a partir de un ambiente externo que ayuda a correr las rutinas. En este caso, para trabajar FORCinel, es necesario descargar Igor Pro (Wavemetrics). Para mayor detalle, ver: [https://wserv4.esc.cam.ac.uk/nanopaleomag/?page\\_id=31](https://wserv4.esc.cam.ac.uk/nanopaleomag/?page_id=31).

Los datos obtenidos, que de igual manera proceden del Micromag AGFM 2900, son trabajados para obtener los diagramas conocidos como FORC.

### *Unmix*

Las curvas Unmix están basadas en un análisis por medio de curvas Gaussianas logarítmicas acumuladas (Robertson and France, 1994), construidas a partir de curvas de adquisición de magnetización remanente isotermal (IRM) en función del logaritmo de campo magnético aplicado (Kruiver *et al.*, 2001). La técnica de “Unmixing” tiene como objetivo discriminar distintas contribuciones posibles y asociar cada una de ellas a fases magnéticas características, además de proporcionar una cuantificación absoluta de valores de coercitividad. Para una explicación con mayor detalle ver: Egli., 2003; Egli., 2004a; 2004b; Heslop, 2015; Maxbauer *et al.*, 2016.

La distribución de coercitividad se deriva de una curva de magnetización donde, teóricamente, ésta se encuentra en función del campo aplicado,  $M(H)$ , y se define como el valor absoluto de su primera derivada. Procesar las curvas de magnetización que proceden del experimento de obtención de IRM aplicándose el cálculo necesario para obtener las distribuciones de coercitividad, se consigue mediante el programa Max Unmix.

Éste software en línea proporciona la posibilidad de análisis de curvas de magnetización, así como de la distribución de coercitividades, como es el caso de este trabajo. De manera implícita, la teoría matemática se encarga de aproximar un modelo de curvas a las mediciones de IRM para poder obtener las distribuciones de coercitividad tanto en escala logarítmica como exponencial. El programa desarrollado por Maxbauer *et al.*, 2016 se basa en, además de un par de adiciones estadísticas para optimizar los modelos de materiales naturales, las siguientes propiedades intrínsecas de cualquier curva de magnetización (Egli, 2004a; 2004b):

- 1) La curva es monótonica (siempre aumenta o disminuye en todo el rango de campo antes seleccionado)
- 2) La curva posee una asíntota a la que se aproxima, progresivamente en campos magnéticos altos aplicados (saturación de la muestra en campos altos)
- 3) La pendiente de la curva sin aplicación de campo siempre es finita (la muestra presenta una magnetización estable en campo cero)

El procedimiento en la rutina para obtener los gráficos de distribución de coercitividad viene indicado a detalle en la página web de MaxUnmix: <http://shinyapps.its.carleton.edu/max-Unmix/>

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN PARTICULAR

### Diagramas de NRM vs. k

Los valores de la NRM y k, dan indicios del contenido de material magnético y la importancia relativa del magnetismo remanente vs. el magnetismo inducido, esto mediante el factor o razón Koenisberger, Q.

Se presentan los resultados obtenidos tras calcular la razón Q en un aproximado de 240 datos, en concreto, entre 15 y 20 por cada sitio de obsidiana. Los gráficos logarítmicos muestran comportamientos variados enfatizando entre los distintos sitios. Se destacan el aumento de NRM, la susceptibilidad inicial, así como comportamientos bimodales a partir del factor de Koenisberger. Para realizar un análisis con mayor detalle, las figuras 6, 7, 8 y 9 desglosan diagramas de NRM vs. K, en conjunto con la razón Q, de manera individual para cada sitio de obsidiana.

### *Hidalgo*

El primer rasgo que destaca luego de observar la figura 7a, yace en tres tendencias de agrupamiento en distintas zonas según diversas magnitudes de NRM y susceptibilidad inicial: la primera de ellas pertenece casi exclusivamente al grueso de datos del sitio de la Sierra de las Navajas (SDN) que presenta un comportamiento similar de la susceptibilidad inicial, no hay variación importante pues se mantiene en un mismo orden de magnitud, al mismo tiempo, es el sitio que mejor agrupamiento posee con respecto a los demás. Igualmente, posee los valores menores de NRM, susceptibilidad, así como la tendencia de valores Q calculados. Se destacan 3 especímenes que aumentan en los tres factores mencionados marcando una separación del resto del grupo.

Para el caso de los sitios El Abra y El Pizarrín (figura 7c y 7e), se mantienen en la misma zona del diagrama K vs NRM, es decir, ambos se ubican en el rango de 20 a 400 ( $10^{-6}$ ) de susceptibilidad inicial, así como de valores que van de los  $10^{-3}$  hasta  $10^{-2}$  A/m. Analizados en sus respectivos gráficos individuales, es más fácil observar que más del 50% de los especímenes de ambos sitios aumentan en su valor Q, no obstante la predominancia de varios especímenes con una aparente tendencia lineal dentro de los valores Q de 1 y 0.1, también para ambos sitios.

El análisis individual de cada sitio identifica dos agrupamientos que se cortan a partir de 100 ( $10^{-6}$  SI) de susceptibilidad inicial, un grupo de especímenes abunda en valores menores de la centena mientras que el otro grupo tiene valores mayores.

Para Tepalzingo (Fig. 7e) se observan dos distribuciones distintas empleando el valor  $Q=1$  como criterio delimitador. En un grupo predominan valores de NRM bajos con una marcada tendencia a aumentar la susceptibilidad hasta valores de más de 1000 ( $10^{-6}$  SI). El segundo grupo únicamente consta de 3 especímenes con una dispersión grande entre ellos y por encima de  $Q=1$ ; dos de ellos poseen los valores más bajos del sitio en cuanto a la K, pero, por otro lado, un tercero sobrepasa el valor de 1000 ( $10^{-6}$  SI).

En Atopixco se observan 2 agrupamientos (Fig. 7f) bien diferenciados, los dos con valores altos de susceptibilidad, de 200 a 1100  $10^{-6}$  SI. Uno de ellos, que forma parte de la 3ª tendencia arriba mencionada, está ubicado encima de la línea que corresponde al valor de  $Q=10$  y valores más altos de NRM (de 1 a 2 A/m). El segundo grupo, presenta una mayor dispersión y pertenece a la 2ª tendencia, con valores menores de Q y NRM de 0.01 a 0.002 A/m,. Un solo espécimen tiene susceptibilidad de un valor significativamente menor a todos, de 2 ( $10^{-6}$  SI).

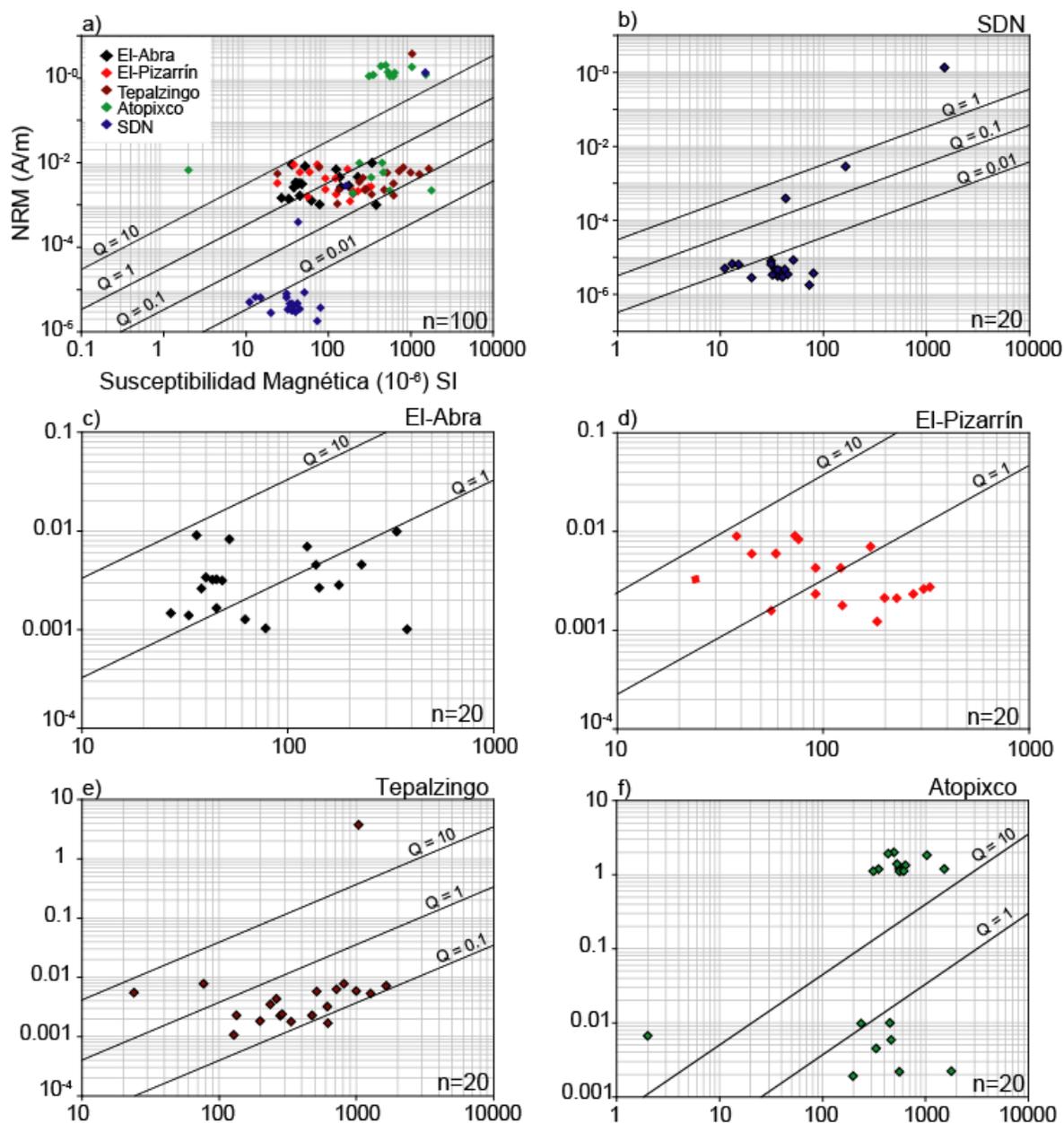


Figura 7. Gráficos que muestran la NRM vs. Susceptibilidad además del factor Koenigsberger o razón  $Q$  para todos los especímenes de las distintas áreas de estudio del Estado de Hidalgo. En a) se agrupan en un solo gráfico los 5 sitios de Hidalgo para analizar los comportamientos entre sí. En b), c), d), e) y f) se muestran gráficos para cada sitio individual. Estos, de manera individualizada, permiten analizar a mayor detalle los comportamientos bimodales que presentan algunos sitios,  $n$  es el número de muestras por sitio trabajadas.

### Puebla

En los distintos comportamientos de los 4 sitios poblanos (figura 8a) se pueden observar que todos ellos muestran una NRM homogénea, de  $10^{-3}$  a  $10^{-2}$  A/m con 2 excepciones de valor menor (del Sitio Tres Cabezas) y 3 de valor mayor (del Sitio Oyameles). La susceptibilidad en cambio, varía de 4 a 1100 ( $10^{-6}$  SI). Con base en el rango de variación

de la susceptibilidad se identifican dos grupos, el de susceptibilidades más bajas, Sitio 3-Cabezas, con 4 a 14 ( $10^{-6}$  SI) y con  $Q=1$  a poco más de 10 y el otro grupo de todos los demás sitios con susceptibilidad de 100 a 1100 ( $10^{-6}$  SI) en promedio y  $Q$  menores, de 1 a poco menos de 0.1. Los sitios de Oyameles y Zaragoza coinciden en comportamientos similares, esto es visto en el gráfico al estar traslapados entre sí especímenes con menores valores de Zaragoza y la gran mayoría para aquellos de Oyameles. Caso parecido se da entre el sitio de Zaragoza e Ixtetal, en que este último posee los valores más altos de susceptibilidad (ver figura 8a).

El grueso de datos que conforma este estado se presenta en rangos de valores de NRM altamente constreñidos y bajos, ya que éstos van de entre  $10^{-2}$  A/m hasta  $10^{-3}$  A/m. Por otro lado, un solo espécimen de Tres Cabezas que presenta los valores más bajos de todo el sitio; un espécimen de Ixtetal (ver figura 8D) con más de 1000 ( $10^{-6}$  SI) de  $k$  pero NRM muy baja, además de un pequeño agrupamiento de 3 muestras más pertenecientes a Oyameles que se comporta de manera diferente a los demás pues está encima de la línea calculada para  $Q=10$ , presenta los valores más altos de  $k$  con respecto a la tendencia del sitio, además de poseer los valores más altos de NRM de todos estos sitios (2 a 7 A/m).

A partir de los valores calculados para el factor de Koenisberger se puede ver que alrededor del 80% de todos los especímenes se encuentran por debajo de  $Q=1$ . La mayor parte del sitio Tres Cabezas se encuentra aislado entre 1 y 10 y el subgrupo de Oyameles sobrepasa  $Q=10$  (figura 8b). Por debajo de  $Q=0.1$  se observan menos de una decena de especímenes pertenecientes a Zaragoza, así como un par de especímenes asociados a Ixtetal que marcan un comportamiento distinto a sus demás homólogos (figura 8e).

Con excepción del sitio Tres Cabezas, cabe decir que los demás sitios poseen, la mayoría de sus especímenes, valores  $Q$  entre 1 y 0.1. Tres Cabezas contiene los valores más bajos de susceptibilidad (5 a 16  $10^{-6}$  SI), como se muestra en la figura 8c.

Oyameles se reparte en grupos que pueden ser diferenciados a partir de los distintos valores de  $K$  y NRM que presentan gran parte de los especímenes. Un primer grupo posee valores de susceptibilidad de entre 70 y 130  $10^{-6}$  SI y  $10^{-2}$  y  $10^{-3}$  A/m. El segundo grupo se posiciona entre valores de 700 a 1000  $10^{-6}$  SI con valores de NRM de 2 a 7 A/m (figura 8b).

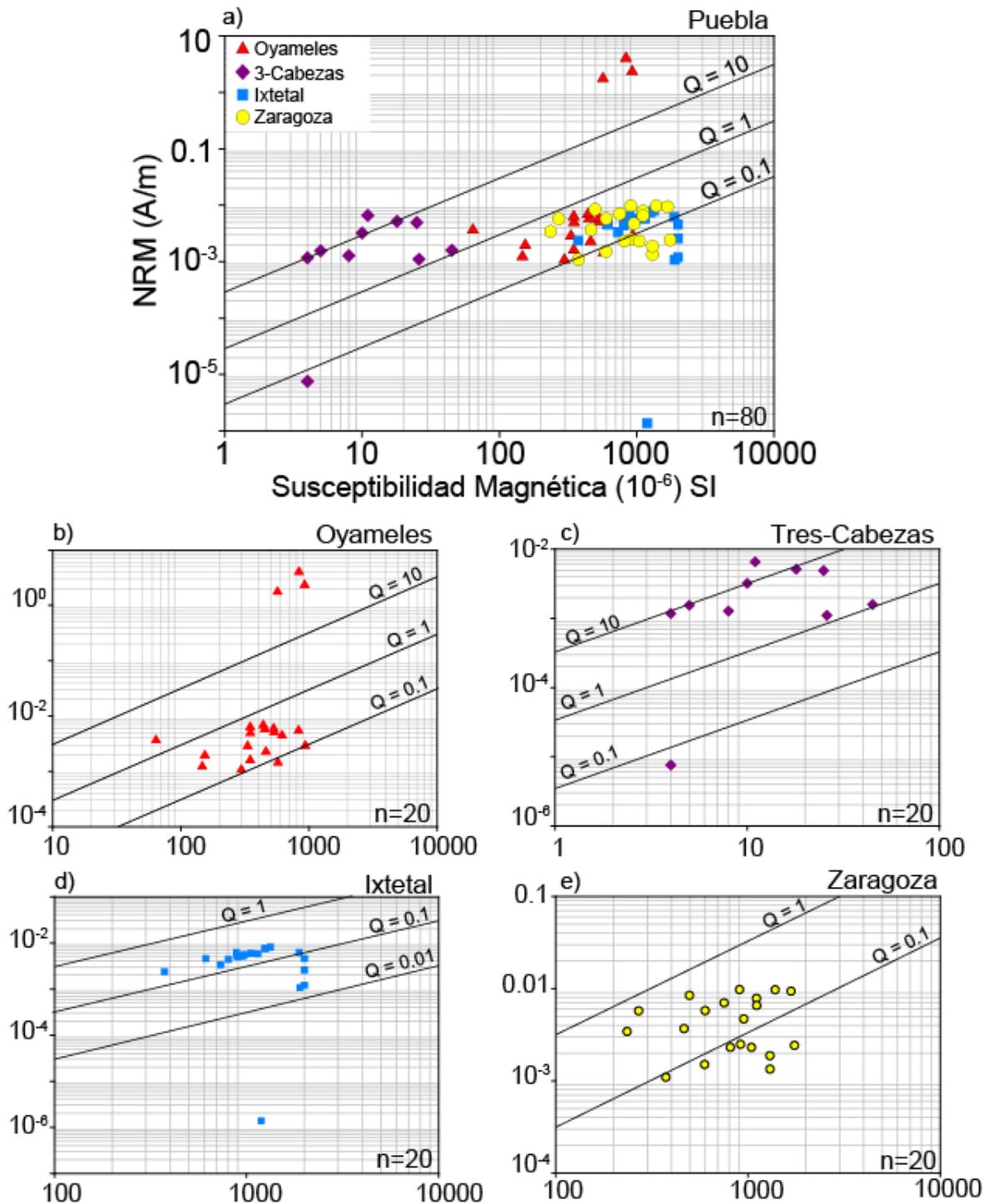


Figura 8. Cuadros de MNR vs K para el Estado de Puebla donde se muestra a) Agrupamiento general para todos los sitios así como las individualizaciones para b) Oyameles, c) 3-Cabezas, d) Ixtetal y e) Zaragoza.

### *Estado de México*

De este lugar se estudiaron 3 yacimientos cuya primera característica a puntualizar es la tendencia de los valores a sobreponerse según la variación de susceptibilidad magnética ( $k$ ) para todos los sitios, así como de presentar rangos bajos de NRM. De manera individual, de Malpaís se reportan los valores más bajos de  $k$  con dos especímenes con valores de entre 30 y 60  $10^{-6}$  SI, el resto del sitio se ubica entre valores de 100 y 1000  $10^{-6}$  SI (Figura 8b). La línea calculada para el factor  $Q= 0.1$  separa este sitio con la mayoría de sus especímenes quedando por debajo de este valor. Para  $Q= 1$  hay menor cantidad de especímenes, sin embargo, hay mayor variación en la susceptibilidad y, caso particular, el espécimen con menor  $k$ , es el único que sobrepasa la línea  $Q= 1$  en tanto que su valor de NRM no es ni el menor ni el mayor del sitio.

En Buenavista (Figura 9c) se observa un comportamiento bimodal donde el elemento diferenciador es la magnitud de la NRM. Valores de entre 1 y 10 A/m se separan de la tendencia general de las obsidias estudiadas que presentan el rango típico de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  A/m. Este último comportamiento presenta una tendencia lineal entre  $k$  y NRM hasta pasados los 1000  $10^{-6}$  SI en donde el comportamiento cambia al descender inversamente la magnitud de NRM conforme aumenta la susceptibilidad magnética. Con respecto a los valores Koenisberger calculados, la línea de  $Q=1$  separa dos comportamientos distintos. Entre las líneas 1 y 0.1 caen dos casos aislados donde está el espécimen con menores valores y el de mayor  $k$  para el sitio que no parecen estar asociados a los dos grupos propuestos anteriormente.

Con respecto al yacimiento de Ixtepec, se pueden observar tres grupos diferenciados a partir de los valores de NRM. Al analizar en conjunto con los valores de susceptibilidad magnética, se pueden observar tres comportamientos distintos, uno bien agrupado y dos con mayor dispersión. Entre los 800 y 1000  $10^{-6}$  SI de  $k$  y  $10^{-3}$  A/m a  $2^{-3}$  A/m hay un comportamiento donde los especímenes se agrupan con menor dispersión entre ellos, algunos se enciman entre sí.

El siguiente grupo es típico con respecto a los comportamientos reportados en este manuscrito, pues los especímenes restantes varían en la susceptibilidad magnética de 400 a 1250  $10^{-6}$  SI con valores NRM menores a  $10^{-2}$  y mayores a  $10^{-3}$ . Un tercer agrupamiento se constriñe entre los 700-900  $10^{-6}$  SI y valores mayores a  $10^{-3}$ . En cuanto a las líneas asociadas al valor  $Q$  calculado, el grupo de mayor NRM está posicionado por encima y por debajo del valor de  $Q=10$ . El resto de los especímenes yace debajo del límite calculado para  $Q=0.1$  (ver figura 9d).

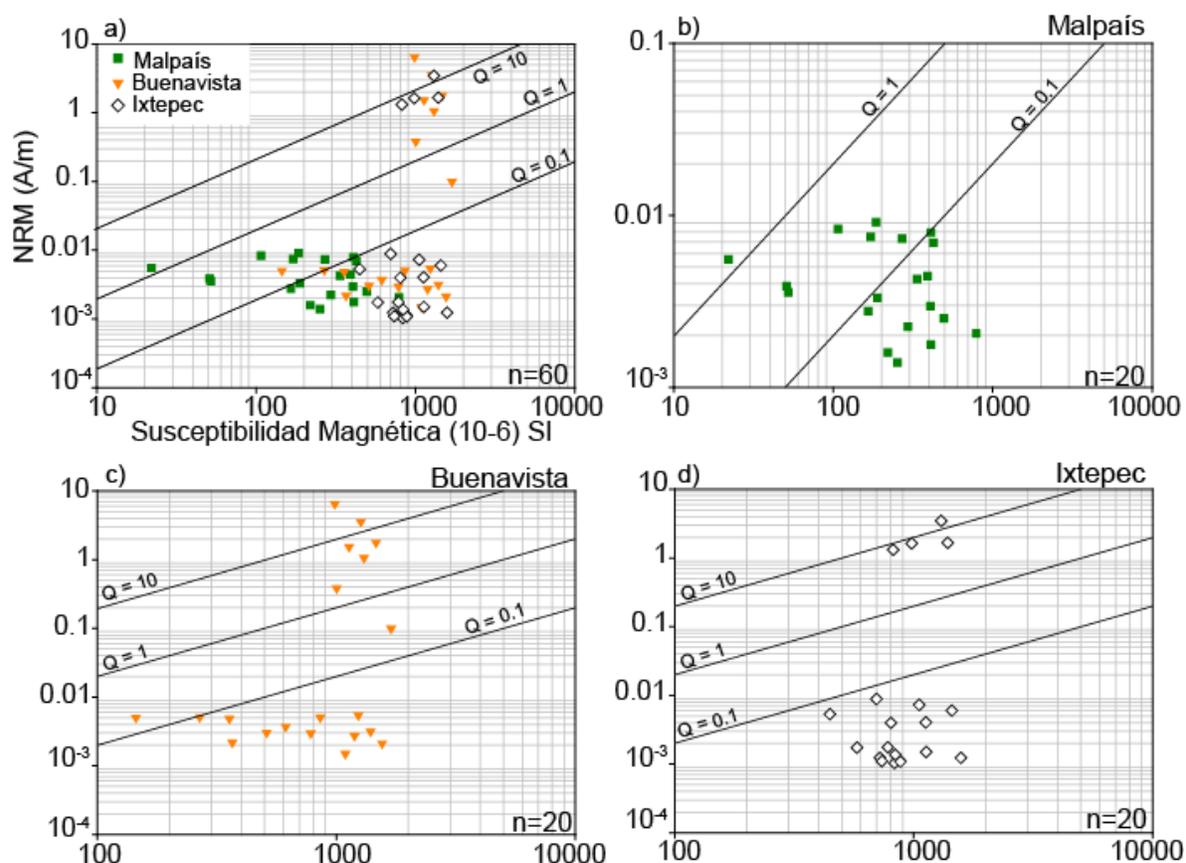


Figura 9. Cuadros de NRM vs  $K$  para los sitios procedentes del Estado de México en donde se muestra el comportamiento conjunto de los tres sitios. b, c y d singularizan cada sitio.

### Michoacán

La variación entre especímenes se da de mejor manera entre la NRM y más sutilmente, con los valores de susceptibilidad. La morfología de los agrupamientos para ambos yacimientos se “expande verticalmente” y no horizontalmente como en los demás sitios analizados salvo Malpaís (ver figura 10a y 9a).

El sitio Ucareo (diamantes morados) muestra tres distintos comportamientos: uno donde hay sólo dos especímenes con valores de NRM más altos de ambos yacimientos; otro que posee rangos de entre  $5 \times 10^{-2}$  a  $9 \times 10^{-2}$  A/m y el tercer grupo, que posee valores de NRM de  $1.5 \times 10^{-3}$  a  $4 \times 10^{-3}$  A/m. Cabe agregar que en este último grupo hay una tendencia de proporcionalidad lineal ascendente entre la NRM y susceptibilidad magnética, así como otras dos ramificaciones lineales que poseen una tendencia constante en valores de NRM (Figura 10b). Todos los grupos, excepto por un espécimen aislado en 100u, presentan valores de  $k$  de entre 120 a  $800 \times 10^{-6}$  SI.

Al igual que Ucareo, en el sitio de Zinapécuaro relucen tres diferentes comportamientos que bordean las líneas calculadas para el factor Q, de tal manera que evidencian claramente una tendencia bimodal con énfasis en la NRM. Hay un agrupamiento constante en valores de susceptibilidad, pero con un aumento progresivo de NRM en  $400 \cdot 10^{-6}$  SI. Este comportamiento es único con respecto a la totalidad de sitios, además de que la mayor parte de las muestras con este comportamiento yacen entre los valores Q de 1 y 0.1. Tal agrupamiento podría indicar que dichas muestras se emparentan con propiedades magnéticas dentro del yacimiento Zinap. Igualmente, esta tendencia vertical cruza en uno de sus especímenes con otra tendencia de incremento proporcional que cubre rangos de k de 190 a casi  $800 \cdot 10^{-6}$  SI (Figura 10a y 10c).

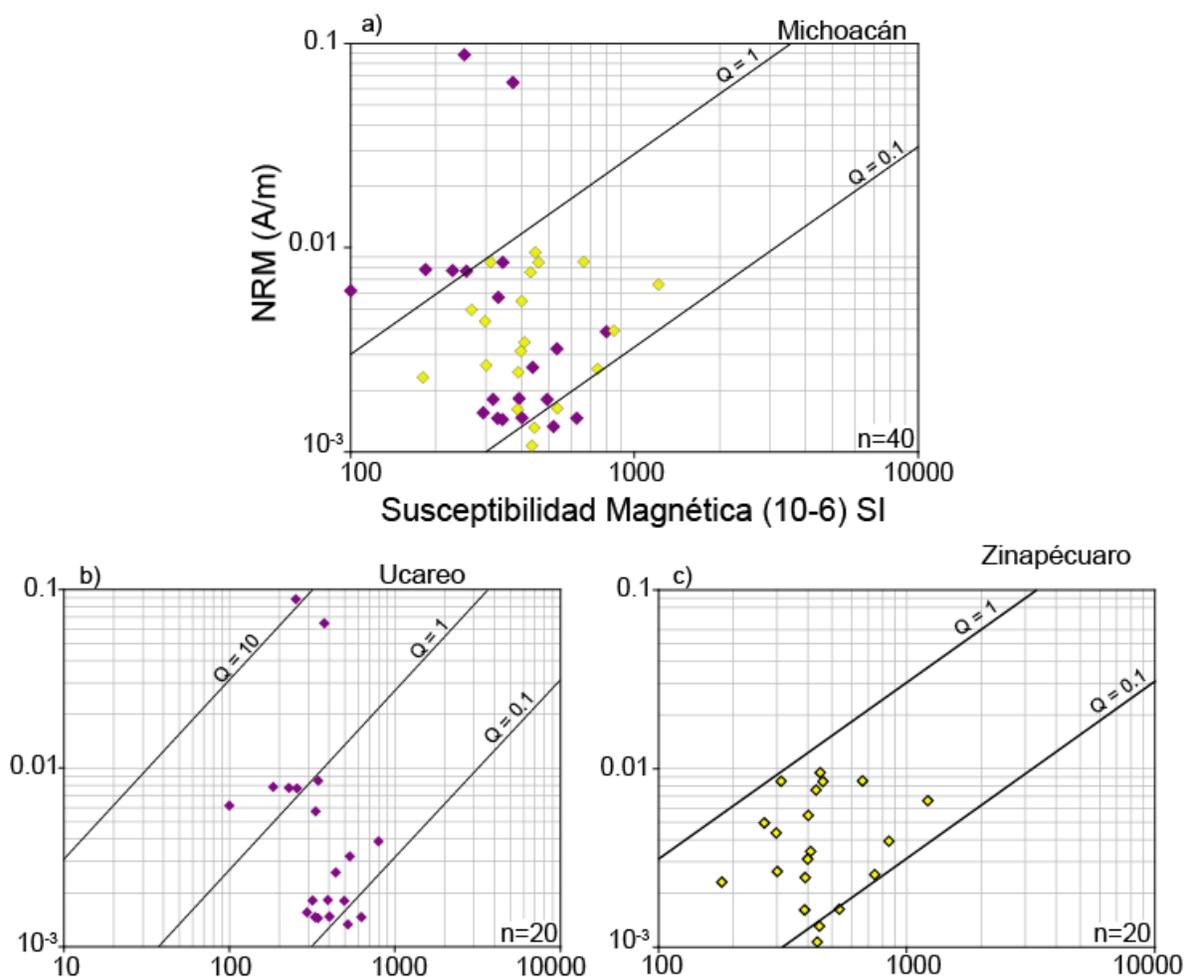


Figura 10. Cuadros de NRM vs K del Estado de Michoacán. Diamantes morados representan los especímenes de Ucareo mientras que mismos símbolos de color amarillo provienen de Zinapécuaro.

### **Susceptibilidad Magnética en función de temperatura baja y alta (K-T)**

A través de la medición de la variación de susceptibilidad en función de la temperatura en una muestra de cada sitio, es posible reconocer la composición de distintas fases magnetomineralógicas, que son asociadas a la mineralogía magnética que contribuye a la remanencia de magnetización para cada sitio de recolección. A continuación, se hará una descripción para cada uno de estos a partir de una curva K-T; mismo caso para las muestras 'in situ' procedentes de Sierra Las Navajas.

Las curvas muestran una gran diversidad de comportamientos K-T. En general, la curva azul claro representa el comportamiento a baja temperatura, esto es, enfriamiento por medio de nitrógeno líquido  $N_2$  hasta  $-192\text{ }^\circ\text{C}$  y subsecuente calentamiento hasta  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . Las curvas rojo y azul oscuro representan las trayectorias de calentamiento y enfriamiento, respectivamente, a altas temperaturas. Las temperaturas de Curie ( $T_C$ ) se enumeran según el caso y los números representan las temperaturas que fueron calculadas según el método diferencial de Tauxe (1998) con el uso de la paquetería Pmagpy en Python por medio de la segunda derivada donde los puntos máximos representan las  $T_C$  (Tauxe *et al.*, 2010).

#### *Hidalgo*

*El-Abra (EA)*. La curva tipo para este sitio presenta una variación mínima de susceptibilidad magnética desde la temperatura asociada a enfriamiento por nitrógeno líquido ( $-192^\circ\text{C}$ ) hasta el calentamiento a  $700^\circ\text{C}$ . Este comportamiento donde K varía en el orden de sólo un par de unidades es visto en otras muestras del Estado, como se verá más adelante.

En cuanto a los comportamientos de alta temperatura, se observa una semi reversibilidad dentro del rango de altas temperaturas, no así, al continuar el enfriamiento ambiental entre  $500\text{-}160^\circ\text{C}$ . Como se observa en la figura 11-I, durante el enfriamiento, la susceptibilidad magnética aumenta 3 unidades y al llegar a temperatura ambiente no rebasa la magnitud inicial registrada previa al desarrollo del experimento. Además, la curva de calentamiento presenta un descenso gradual conforme aumenta la temperatura. Esta trayectoria se mantiene hasta llegar a los  $420\text{ }^\circ\text{C}$ , donde hay un breve comportamiento constante de K, e incluso, ésta aumenta ligeramente pasados los  $500\text{ }^\circ\text{C}$ . Posteriormente, se presenta una  $T_C$  manifestada en una caída abrupta de la susceptibilidad para  $562\text{ }^\circ\text{C}$ , tal valor es asociado a un contenido de magnetita.

La curva de enfriamiento en alta temperatura muestra un comportamiento mimético a la curva de calentamiento entre  $600\text{-}500^\circ\text{C}$  independiente al aumento de susceptibilidad. Que la curva se sitúe por encima de la curva de calentamiento sugiere la formación mínima de óxidos de Fe. Rebasados los  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , vuelve a presentarse un cambio de pendiente, este

tipo de comportamientos en valores de altas temperaturas pueden asociarse a un contenido fino de hematita.

En la curva de baja temperatura (-192 a 0 °C) hay un descenso gradual de la susceptibilidad hasta llegar a los -150 °C donde el cambio de pendiente es evidente. En ese sentido, esta manifestación es típica del comportamiento cristalino de la magnetita a muy bajas temperaturas, llamado transición de Verwey ( $T_V$ ). El aumento en la señal que aparenta ruido al alcanzar los 0 °C sugiere la posible presencia de hematita, lo que corrobora la  $T_c > 600$  °C en la curva de alta temperatura. Esta señal ruidosa no aparece por ejemplo en la muestra de Tepalzingo, pero sí aparece en la curva que corresponde a El Pizarrín. No obstante, como se verá más adelante en los diagramas FORC y Unmix, estos resultados no se cotejan (Figura 11-I).

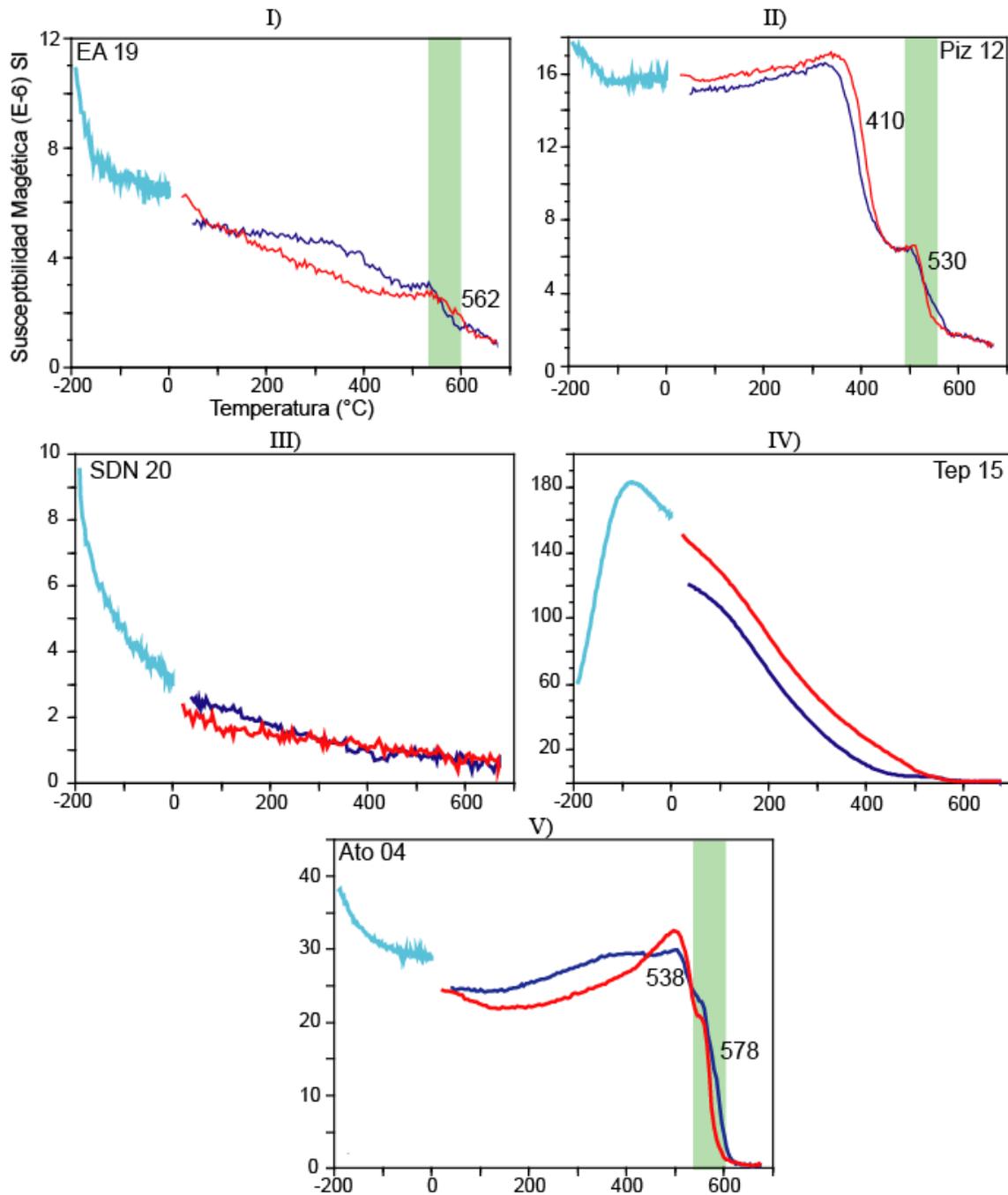


Figura 11. Curvas características  $k$  vs  $T$  para los yacimientos del estado de Hidalgo. I) EA-19, II) PIZ-12, III) SDN-20, IV) Tep-15 y V) Ato-04 correspondientes a los yacimientos de El Abra, El Pizarrín, Sierra de las Navajas, Tepalcingo y Atopixco, respectivamente.

El-Pizarrín (Piz). Este espécimen también presenta valores muy bajos de susceptibilidad magnética, del mismo orden de magnitud que EA (El Abra). Las curvas de alta temperatura son altamente reversibles. La morfología presente toma forma “escalonada” descendente a

partir de los 300 °C. Al inicio, en temperatura ambiente y conforme esta va en aumento, la susceptibilidad aumenta ligeramente (Figura 10-II).

Dicho aumento de la susceptibilidad toma lugar algunos grados de temperatura antes de una caída abrupta, en donde se forma un pico de Hopkinson posiblemente con una  $T_C$  desplazada por efectos de transformación en el grano magnético (Hopkinson, 1889; Dunlop & Özdemir, 2007) a 410 °C, asociado a un contenido de Titanomagnetita pobre en titanio y tamaños de grano MD. Sucesivo a este primer escalón, hay una segunda  $T_C$  a los 530 °C. Además, debido a la morfología y  $T_C$ s asociadas, se puede pensar en un contenido de maghemita o hematita, con  $T_C > 600$  °C del orden volumétrico fino (Bilardello, 2020). Contrastando algunos rangos de temperatura, la curva de enfriamiento (azul oscuro) aumenta la  $K$  a partir de  $T_C$  de 530 °C; presenta los mismos escalones y al momento de alcanzar los 350°C disminuye ligeramente la susceptibilidad magnética. Debido a que no hay cambios drásticos en las curvas de calentamiento/enfriamiento se asume que no hay alteración o cambios de fases mineralógicas.

La curva de baja temperatura presenta inicialmente un cambio drástico en la susceptibilidad y, durante el calentamiento, a partir de los -100°C comienza a manifestar un aumento muy ligero de  $K$ . El comportamiento de susceptibilidad es casi constante.

*Sierra de las Navajas (SDN)*. De las cinco curvas analizadas para Hidalgo, la perteneciente a SDN es la que menor susceptibilidad magnética presenta durante el proceso de calentamiento-enfriamiento. Esto concuerda con los resultados de susceptibilidad inicial vistos anteriormente (Figura 10-III), así como con los resultados dependientes de aplicación de campo magnético que se verán más adelante.

El comportamiento de la curva durante la medición en baja temperatura es de una caída con tendencia exponencial que sugiere una abundancia predominante de partículas paramagnéticas (Bowles *et al.*, 2009).

Continuando con la trayectoria descrita, las curvas de calentamiento y enfriamiento a alta temperatura disminuyen en la susceptibilidad gradualmente mientras aumenta la temperatura.

*Tepalzingo (Tep)*. Esta curva presenta un aumento de susceptibilidad hasta alcanzar los valores más altos para los cinco sitios de la región. La característica más evidente es un aumento de tres veces el valor inicial de  $K$  en un rango que inicia en -192°C hasta el punto máximo alrededor de los -70°C, seguida de una caída drástica hasta los 0°C.

Esta curva muestra un comportamiento típico de TM (Titanomagnetita) predominante (Dunlop y Özdemir, 2015). En consonancia con lo anterior, en la curva de calentamiento se aprecia únicamente una  $T_C$  entre los 150-200°C relacionada a rangos de  $T_C$  para TM pobres en Ti. En la curva de enfriamiento se observa una reversibilidad cercana al 80%, así como pérdida apreciable de susceptibilidad con respecto al valor inicial del experimento. Alrededor de los 500-550°C es posible constatar un ligero cambio de pendiente asociada típicamente con la formación de un contenido muy bajo de magnetita (Figura 11-IV).

*Atopixco (Ato)*. Después de Tepalzingo, es la curva que posee valores más altos en cuanto al comportamiento de susceptibilidad dependiente de la temperatura. La curva correspondiente a este sitio es semi-reversible.

Durante el calentamiento entre los 500-600°C es posible ver un cambio de fases. La primer componente magnética se encuentra en los 538°C lo que junto con el pico de Hopkinson sugieren un contenido de magnetita. De igual manera, asociado a los valores más altos de susceptibilidad inicial (k), esta muestra presenta valores por encima de la media del sitio Atopixco. Continuando con el calentamiento es posible constatar magnetita señalada por la caída abrupta de susceptibilidad en 578°C (figura 10-V).

Respecto a la curva de enfriamiento, ésta muestra una trayectoria ligeramente distinta a la curva de calentamiento, con aumento de la susceptibilidad magnética a partir de los 410°C conforme alcanza una temperatura ambiente. El abultamiento formado (de 0 a aproximadamente 410°C) donde la curva azul está por encima de la roja es similar a las curvas de Estado de México y Michoacán (figuras 12 y 13). Por su parte, en la curva de baja temperatura muestra un decaimiento exponencial de la susceptibilidad magnética durante el proceso de calentamiento conforme se alcanza la temperatura ambiente. Sin embargo, alrededor de los -150 °C se detecta un ligero cambio en la magnetización, formando un escalón minúsculo para continuar con la caída conforme el calentamiento aumenta. Lo anterior sugiere la presencia mínima de magnetita a bajas temperaturas posiblemente asociada a oxidación (Tauxe, 2010).

### *Puebla*

*Oyameles (Oyam)*. Los cuatro sitios de Puebla también presentan una variación significativa entre ellos. Todos se manifiestan con valores muy bajos de susceptibilidad, no obstante, es posible determinar la mineralogía magnética que impera en la mayoría.

Para Oyameles, las curvas de calentamiento y enfriamiento a alta temperatura presentan poca reversibilidad. El comportamiento y la morfología son parecidas a la

muestra analizada de El-Abra con la diferencia de que, en ésta, hay una formación mineral mínima debido al aumento de susceptibilidad durante el trayecto de enfriamiento  $T_C$ .

Como se mencionó anteriormente, la magnitud de susceptibilidad magnética nuevamente es muy baja, incluso disminuye desde  $-195\text{ }^\circ\text{C}$ , si bien la caída de susceptibilidad no es tan drástica pasada la temperatura ambiental, el comportamiento es idéntico a las curvas donde la contribución de partículas paramagnéticas predomina sobre fases magnéticas (Ver figura 11-I). Esto es aseverado debido a la nula presencia de transiciones como Verwey o Morin. Con relación a lo anterior, la curva de calentamiento presenta decaimiento gradual donde la única  $T_C$  se presenta a los  $422\text{ }^\circ\text{C}$ .

Por otro lado, la curva de enfriamiento en altas temperaturas posee un cambio de pendiente más pronunciado, este cambio se encuentra entre los  $550\text{-}580\text{ }^\circ\text{C}$  y, debido a la morfología de la curva, este comportamiento es asociable a un contenido mínimo de greigita (Roberts, 1995; Roberts *et al.*, 2011).

*Tres-Cabezas (TC)*. Este sitio presenta un comportamiento atípico donde las curvas de alta temperatura son reversibles hasta antes de rebasar los  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , de altas hacia bajas temperaturas (figura 11-II). A partir de aquí, se pierde la susceptibilidad ligeramente para la curva de enfriamiento pues termina por debajo del proceso de calentamiento. Esta curva posee una  $T_C$  de  $570\text{ }^\circ\text{C}$  además de una morfología similar a un pico de Hopkinson pero con dimensiones fuera de lo común al ser un pico pequeño donde el aumento de susceptibilidad es asociado a magnetita MD (Henry, 2007). Cabe agregar que es la única curva cuyo fin de medición llega sólo a los  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , de ahí que parezca estar cortada.

La curva de baja temperatura presenta una caída acelerada de susceptibilidad conforme la temperatura asciende. No obstante, el descenso de ésta parece estar constituida por múltiples escalones que se van alargando hasta un punto mínimo alrededor de  $-95\text{ }^\circ\text{C}$ . Posteriormente, se presenta un ascenso igualmente pronunciado, con mayor ruido, que termina alrededor de la mitad de la magnitud de susceptibilidad con la que se inició el experimento. Esto puede asociarse a errores de medición.

*Ixtetal (Ixtet)*. Las curvas de alta temperatura son totalmente reversibles por lo que no hay transformación mineral. Esta muestra contiene los valores más altos de susceptibilidad asociados a los sitios de Puebla, así como un ascenso progresivo de la susceptibilidad conforme aumenta la temperatura. Alrededor de las  $55 (10^{-6})$  de susceptibilidad magnética comienza a formarse un pico de Hopkinson, la  $T_C$  posterior a este pico está calculada para

los 580 °C, lo que sugiere un contenido significativo de magnetita con estructura cristalina más pura ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). La morfología de esta curva contiene un pico de Hopkinson con una altura y una disminución de la susceptibilidad magnética gradual que sugiere una combinación de partículas de magnetita por encima del tamaño reportado para partículas SD así como de tamaños aún mayores pero sin llegar a MD (Dunlop, 1974; Dunlop, 2014).

En cuanto a la curva de baja temperatura, presenta una clara transición de Verwey entre los -150 y -160 °C. No obstante, el desplazamiento atípico en términos del rango de temperatura en esta transformación, sugiere que la estructura cristalina del mineral magnetita presenta una variación en los tamaños de partícula magnética, (Dunlop & Özdemir, 2015; Özdemir *et al.*, 1993) seguido por una caída gradual de la susceptibilidad hasta llegar a temperatura ambiente.

*Zaragoza (Zaa)*. La segunda curva con mayor susceptibilidad igualmente presenta una reversibilidad completa. Sin embargo, la curva de enfriamiento termina mínimamente por debajo de la trayectoria de calentamiento. La primera temperatura de Curie es calculada a 398 °C, esta fase, aunado a una sutil transición de Verwey a baja temperatura (curva azul claro) con morfología característica de un proceso de oxidación (Tauxe, 2010) señalan un contenido de maghemita en proceso de transición a magnetita. Además, la pérdida drástica de magnetización poco antes de llegar a los 400 °C es similar a una morfología sugerida para casos de maghemitización exigua con picos y caídas drásticas de susceptibilidad entre los 150 y 350°C (Bilardello, 2020). Continuando con el calentamiento, se presenta una  $T_c$  asociada al contenido de magnetita empobrecida en Ti.

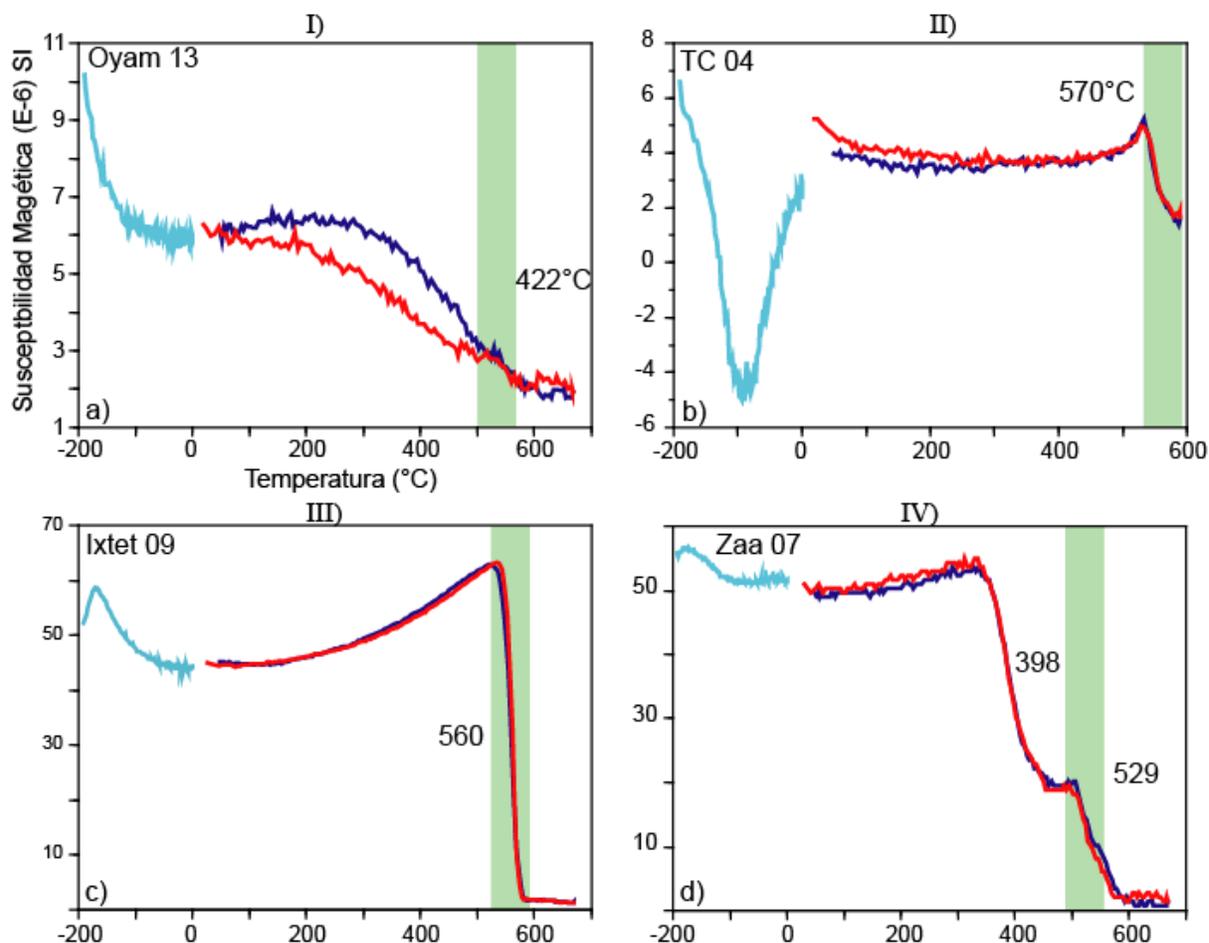


Figura 12. Curvas características  $k$  vs  $T$  para cada uno de los yacimientos del estado de Puebla. Cada gráfico representa un sitio y una curva característica de un espécimen: I) Oyameles-Oyam 13, II) Tres Cabezas-TC 04, III) Ixtetal-Ixtet 09 y IV) Zaragoza-Zaa 07.

### Estado de México

Buena Vista (Bue). Como se aprecia en la figura 13-I, el gráfico muestra reversibilidad casi completa, no obstante, se aprecia una disminución de susceptibilidad magnética en la curva de enfriamiento que señala una transformación de magnetita SD a tamaños mayores conforme la temperatura disminuye.

La curva de calentamiento presenta un aumento de susceptibilidad gradual que inicia alrededor de los 110°C hasta alcanzar a formar un pico de Hopkinson con una posterior caída drástica, una  $T_c = 580^\circ\text{C}$ . Este fenómeno es apreciable gráficamente como un pico pronunciado, estrecho entre los extremos. Además, poco antes de alcanzar los 600°C, luego de la caída de susceptibilidad asociada a contenido de magnetita, es posible apreciar un comportamiento metaestable o sin variación de susceptibilidad conforme sigue aumentando la temperatura para ambas curvas, este comportamiento sugiere un contenido muy bajo de Hematita. La curva de enfriamiento a alta temperatura deja su trayectoria

reversible entre 550-580°C y mantiene un comportamiento sin variación de susceptibilidad conforme la temperatura sigue descendiendo hasta pasados los 460°C donde comienza a disminuir gradualmente, simulando a la curva de calentamiento, pero con mayor susceptibilidad (figura 13-I). Tal comportamiento, asociado a su vez a la morfología de la curva entre 460 y 560°C sugiere, de acuerdo con las pruebas de Dunlop (2014), una transformación sin cambio de fase entre magnetita, pues pasa de un comportamiento asociado a tamaños de partícula que tienden al límite SD o tamaño mayor, sin llegar a MD.

Para el caso de la curva de enfriamiento, ésta inicia con un pico breve de aumento de susceptibilidad seguido de una caída gradual. Esta morfología puede ser asociada a un contenido de magnetita con defectos en su estructura. Luego de una caída de susceptibilidad gradual conforme la muestra adquiere temperatura ambiente, en el gráfico se puede observar un comportamiento somero asociado a una transición de Morin  $T_M$  (Bowles *et al.*, 2010) que sugiere un contenido mínimo de hematita.

*Ixtepec (Ix)*. La curva de calentamiento para este sitio posee una reversibilidad de alrededor del 90%, es visible un pico de Hopkinson cuya forma está más definida, comparada a las analizadas anteriormente (figura 13-II). La  $T_C$  está ubicada alrededor de los 540 °C, dentro del rango de titanomagnetitas empobrecidas en Ti.

A su vez, la curva de enfriamiento en alta temperatura está desfasada a la derecha y por encima de la trayectoria de calentamiento; comienza a ascender a una mayor temperatura. Durante todo el experimento dicha curva se mantiene por encima del trayecto de calentamiento (figura 13-II). Esto puede relacionarse a una modificación incipiente de composición, cambio en la estructura cristalina y, por tanto, en la formación de una fase con mayor susceptibilidad a magnetizarse.

En cuanto a la curva de baja temperatura, presenta un comportamiento metaestable desde el inicio del experimento (-192 °C) hasta llegar a 0 °C donde la pérdida de remanencia es poco menos de la tercera parte inicial. No hay transiciones importantes que se relacionan a una  $T_V$  o  $T_M$  (transición de Verwey y Morin, respectivamente) (figura 13-II).

*Malpaís (Mal)*. El tercer sitio perteneciente al Estado de México posee un comportamiento similar a sus antecesores además de ser el que menor susceptibilidad presenta. La curva de calentamiento, de igual manera, se destaca por un pico de Hopkinson, más estrecho, menos prominente y con mayor ruido; su temperatura de Curie en 580°C sugiere un contenido de magnetita (figura 13-II).

En este caso, la curva de enfriamiento es reversible hasta llegar a 530 °C. A partir de aquí y hasta finalizar el experimento, yace por encima de la curva de calentamiento. Al igual que el sitio Bue 15, hay una disminución y subsecuente aumento de susceptibilidad entre 0 y 200 °C (figura 13-II).

Para el caso de la curva de enfriamiento, ésta inicia con un breve aumento de susceptibilidad seguido de una caída gradual. Tal morfología de un pico de tamaño pequeño que se da entre los -180 y -170 °C. Al mismo tiempo, conforme la temperatura aumenta, entre -70 y 0°C, se observa un comportamiento asociado a una transición de Morin  $T_M$  más definido que sugiere un contenido de hematita. Esta transición es más visible con respecto a otras gráficas, pues el cambio de trayectoria es visible entre los -20 y -30 °C (figura 12-III).

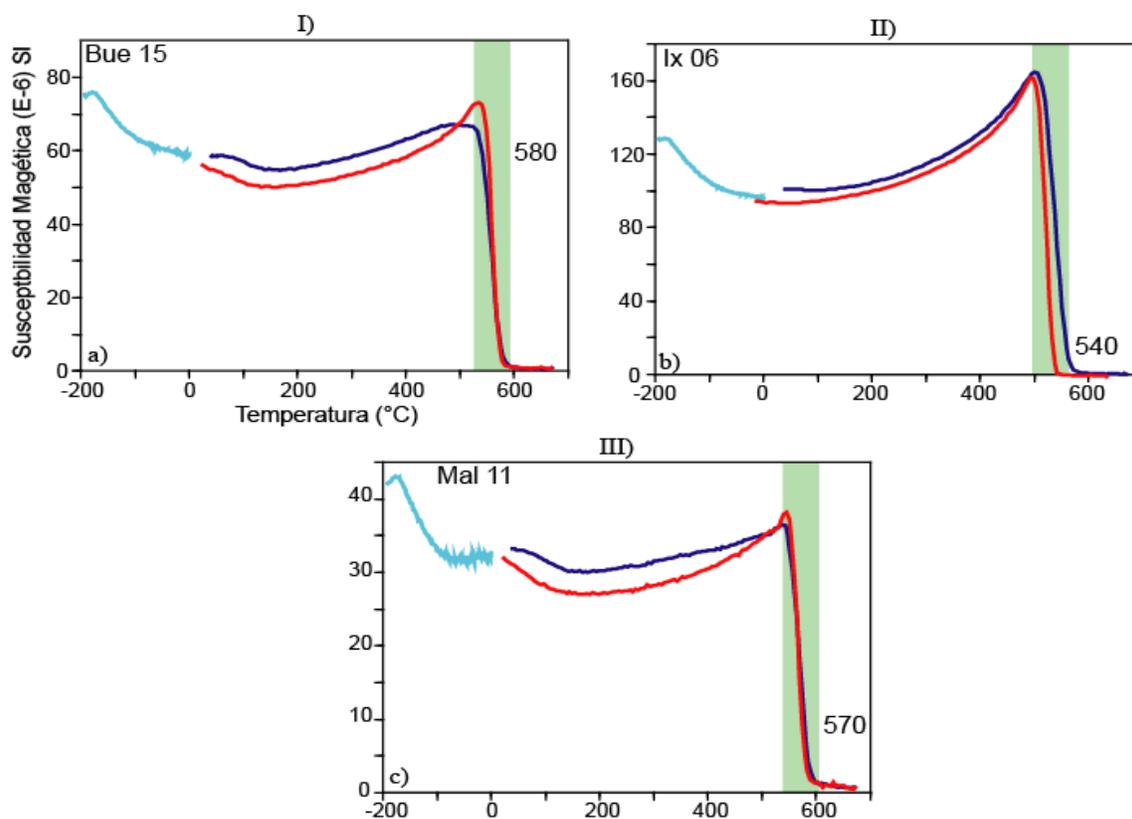


Figura 13. Curvas características  $k$  vs  $T$  para cada uno de los yacimientos del estado de Estado de México: Buenavista, Ixtepec y Malpaís (Bue 15, IX 06 y Mal 11).

## Michoacán

Zinapécuaro (Zinap). Ambos sitios de Michoacán presentan comportamientos semejantes. También en este caso, una manera clara de diferenciarlos es la respuesta que posee la susceptibilidad magnética de cada sitio.

Para el sitio de Zinapécuaro (ver figura 14-I) se puede observar que la curva de calentamiento forma una geometría cóncava con disminución de susceptibilidad desde temperatura ambiente hasta 350 °C donde da inicio un comportamiento distinto. Este, conlleva un aumento acelerado de susceptibilidad a altas temperaturas hasta formar un pico de Hopkinson pronunciado y una posterior  $T_C$  calculada para 573 °C.

La curva de enfriamiento en alta temperatura se comporta reversiblemente hasta 550-560°C donde el aumento de susceptibilidad forma un pico con mayor altura y apertura. Igualmente, hay presencia de una disminución de susceptibilidad, similar al que ocurre durante el calentamiento; en este caso puede deberse a una transformación mineralógica distinta, en específico, un caso similar a los mencionados anteriormente (Estado de México) con comportamientos de partículas con mayor tamaño (Dunlop, 2015).

A la par, en la curva de enfriamiento se pueden observar dos comportamientos, el primero se da entre -192 °C y -110 °C en donde se presenta un aumento de susceptibilidad casi imperceptible; el segundo comportamiento es un ascenso de susceptibilidad ya más claro en el gráfico que genera una morfología de arco con pendientes suaves hasta llegar a 0 °C (figura 14-I).

Ucareo (Uc). Este sitio corresponde a sitios con valores intermedios de susceptibilidad con respecto a los demás sitios, pero menores a los de Zinapécuaro (ver figura 14-II). El comportamiento de las curvas en alta temperatura es similar al anterior con una diferencia para la curva de enfriamiento; a diferencia de Zinap 03, durante el enfriamiento en alta temperatura la curva es reversible, i.e., el pico de Hopkinson no sobrepasa al formado durante el calentamiento de manera significativa. Esta curva posee una  $T_C$  de

También, hay un comportamiento después del pico donde hay una pérdida muy lenta de susceptibilidad bajando hacia los 450°C y, poco antes de sobrepasar los 100°C, hay una ganancia de la ésta., Este ascenso parece conectar con el fin de la curva de baja temperatura al acercarse a valores de temperatura ambiental. Tales comportamientos se perciben tanto en Zinapécuaro como en sitios del Estado de México (ver figura 14-II y 13).

Los dos sitios de Michoacán presentan una morfología muy similar en los dos tipos de curvas, en el caso de las curvas a baja temperatura, Ucareo presenta un comportamiento bimodal más contundente, pues el segundo comportamiento presenta una morfología más establecida, simulando una pequeña campana que termina indicando una pérdida de remanencia al llegar a 0°C.

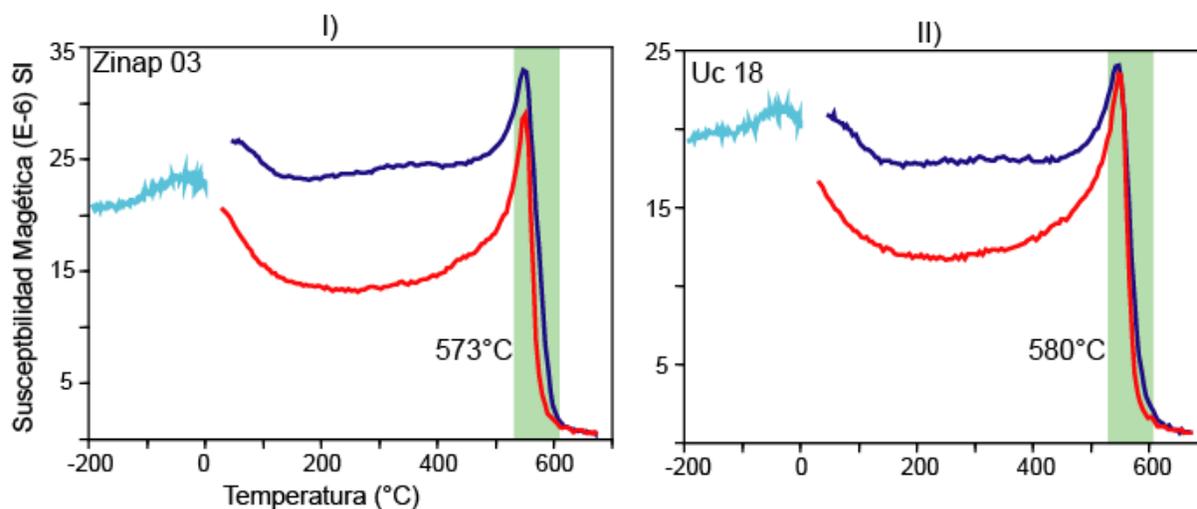


Figura 14. Curvas características  $k$  vs  $T$  para cada uno de los yacimientos del estado de Michoacán (Zinap 03 y Uc 18).

### Obsidiana In Situ de las Sierra de las Navajas

Se reportan los comportamientos de susceptibilidad dependiente de temperatura (K-T) para cuatro sitios de obsidiana dentro de la zona denominada Sierra de las Navajas, al norte del poblado Nopalillo, sureste del estado de Hidalgo.

*Obsidiana perlítica.* La denominación perlítica se debe a que esta muestra fue tomada a partir de un flujo de obsidiana con características similares a las reportadas por Hinojosa-Prieto *et al.*, 2016.

Las curvas medidas durante calentamiento y enfriamiento a altas temperaturas (roja y azul, respectivamente) muestran un comportamiento particular: ambas curvas poseen un cambio de pendiente alrededor de los 540°C además de continuar la trayectoria de pérdida de susceptibilidad magnética que inicia en valores más altos (desde 40 E-6 SI) durante el enfriamiento con nitrógeno (ver figura 15-I). En las curvas de alta temperatura se aprecia una caída o cambio de pendiente en la susceptibilidad, por lo tanto, su  $T_C$  es de 540 °C y sugiere un contenido predominante de Titanomagnetita empobrecida en Ti. La curva de enfriamiento a baja temperatura parte de 35 ( $10^{-6}$  SI), el mayor valor durante todo el proceso

de medición hasta llegar a 680 °C; conforme la temperatura aumenta la susceptibilidad disminuye, no obstante, un breve cambio entre -170 y -80 °C donde el ruido es mayor. Posteriormente, la susceptibilidad llega a los valores bajos de 5 ( $10^{-6}$  SI) (figura 15-I).

*Obsidiana Multicolor.* El nombre de esta muestra hace referencia a una muestra de mano de la también llamada “obsidiana meca” que posee una característica visual llamativa donde la combinación de colores asociados a contenidos de Fe, entre rojo y marrón, junto con negro, la hacen fácil de detectar.

De las cuatro muestras recolectadas, esta es la que presenta un comportamiento característico a mayores valores de susceptibilidad comparando con todas las muestras trabajadas (Figura 15-II). Las curvas de enfriamiento y calentamiento a altas temperaturas no muestran reversibilidad tras pasar los 560 °C en descenso de temperatura.

La curva de calentamiento revela un pico de Hopkinson altamente estrecho, similar a los que ocurren en los sitios ZINAP-03, UC-18 o TC-04. Tal morfología, como se ha visto previamente, sugiere presencia de tamaños de partícula asociados a SD (dominio sencillo) tal cual se aprecia más adelante en el diagrama FORC de esta muestra. Se destaca la pérdida de susceptibilidad una vez se desciende a temperaturas menores a los 550 y 400 °C para la curva de calentamiento y enfriamiento.

El desplazamiento presente en la curva de enfriamiento (azul oscuro) sugiere una incipiente transformación, posiblemente asociada a un proceso de oxidación (Dunlop & Özdemir, 2000).

La curva de baja temperatura aparenta comportarse de manera lineal. Hay una ligera caída en los valores más fríos, no obstante, conforme se llega a temperatura ambiental, la susceptibilidad continúa disminuyendo (figura 15-II).

*Obsidiana Mina Pómez.* Como lo sugiere el nombre, esta muestra fue extraída de un afloramiento asociado a una mina de piedra pómez, en las cercanías de las minas de obsidiana actuales en Sierra de las Navajas.

Esta curva presenta trayectorias escalonadas en las curvas de altas temperaturas, además de que los valores de susceptibilidad se asemejan a los anteriormente reportados, páginas atrás. También, las curvas se comportan de manera irreversible y al comparar la curva de calentamiento con la de enfriamiento, se aprecia claramente la desaparición de una fase casi al final del experimento en altas temperaturas (figura 15-III).

La curva de calentamiento presenta una  $T_C$  de 295 °C sugiriendo un contenido significativo de Titanomagnetita enriquecida en Ti. Al llegar a los 540 °C se reporta una segunda  $T_C$  de 550 °C y, posteriormente, la susceptibilidad decae conforme aumenta la temperatura. Además de mostrarse irreversible, la curva de enfriamiento no presenta la fase asociada a alto contenido de Ti. La desaparición de la curva con cambio de pendiente a 295 °C y algunos segmentos donde está por encima de su homóloga de color rojo sugiere un proceso claro de transformación mineral (ver figura 15-III).

La curva de enfriamiento por nitrógeno no revela demasiada información pues la pérdida de susceptibilidad no posee algún comportamiento asociativo a presencia de fases magnéticas (ver figura 15-III).

*Obsidiana Dorada.* Esta muestra, de color café claro y muy transparente, igualmente, muestra un comportamiento en altas temperaturas con tendencia lineal y pendiente negativa, lo que sugiere una predominancia de material paramagnético, esto se corrobora con el comportamiento de la curva de enfriamiento por nitrógeno líquido además del comportamiento similar de SDN 20 (ver figura 15-IV y 11-III).

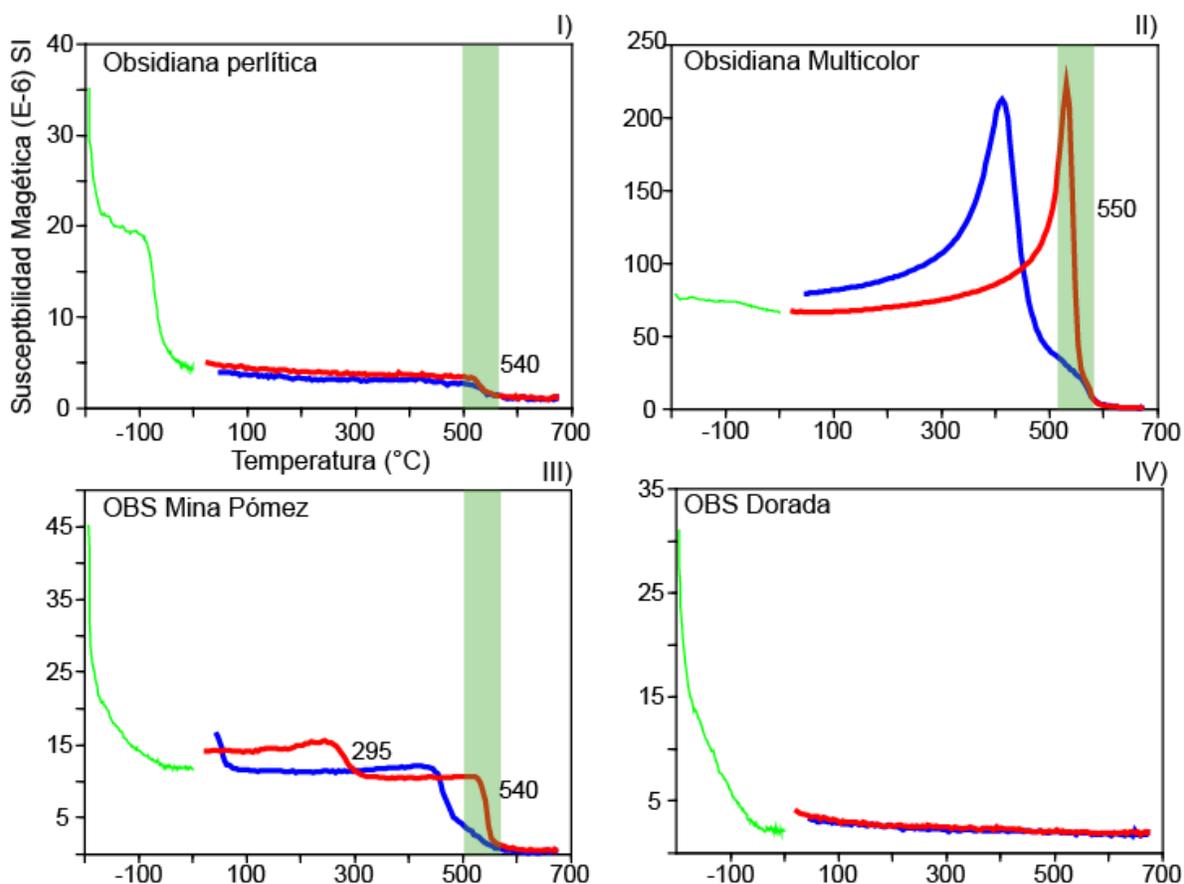


Figura 15. Gráficas K – T para los especímenes de obsidiana *In situ* procedentes de Sierra de las Navajas, Estado de Hidalgo.

### Propiedades magnéticas dependientes de campo magnético

#### *Ciclos de histéresis, diagramas FORC y curvas Unmix*

En las figuras representativas de cada estado (16-21) se muestran las propiedades magnéticas dependientes de aplicación de campo magnético, e.g. ciclos de histéresis con comportamientos diversos (curva roja representa el ciclo de histéresis sin corrección alguna mientras la curva azul muestra el ciclo con corrección por pendiente paramagnética y masa específica de la muestra), diagramas FORC que complementan el ciclo histérico, y curvas Unmix. De todos estos experimentos se utilizó un espécimen por cada sitio.

Tabla 2. Valores de parámetros de histéresis para muestras representativas de los 14 sitios de trabajo.  $H_{cr}$  corresponde a la remanencia de coercitividad;  $H_c$  es la coercitividad;  $M_{rs}$  es remanencia de saturación y  $M_s$  es la saturación de magnetización. Las penúltimas dos columnas del extremo derecho son los cocientes propuestos por Day et al., 1977 así como el parámetro de forma de Fabian, 2003. Los asteriscos resaltan el par de especímenes que resultaron ser wasp-waisted.

Sitio	$H_{cr}$ (mT)	$H_c$ (mT)	$M_{rs}$ ( $\mu\text{Am}^2/\text{kg}$ )	$M_c$ ( $\mu\text{Am}^2/\text{kg}$ )	$H_{cr}/H_c$	$M_{rs}/M_s$	$\sigma$ Hyst
OYAM-13	67.55	45133	$2.15 \times 10^{-7}$	$1.33 \times 10^{-6}$	2.53	$1.62 \times 10^{-1}$	-0,4
TC-04	70.13	33.5	$4.60 \times 10^{-8}$	$1.76 \times 10^{-7}$	45171	$2.61 \times 10^{-1}$	-0,282
ZAA-07	48.56	45061	$4.56 \times 10^{-7}$	$4.24 \times 10^{-7}$	3.13	$1.08 \times 10^{-1}$	-0,487
IXTET-09	18.31	8.34	$1.39 \times 10^{-5}$	$1.29 \times 10^{-4}$	2.20	$1.08 \times 10^{-1}$	-0,356
IX-06	86.63	35.2	$1.36 \times 10^{-6}$	$5.39 \times 10^{-6}$	2.46	$2.52 \times 10^{-1}$	-0,098
MAL-11	55.45	45008	$3.18 \times 10^{-7}$	$2.04 \times 10^{-6}$	2.38	$1.56 \times 10^{-1}$	-0,328
BUE-15	41.81	45004	$9.43 \times 10^{-7}$	$5.56 \times 10^{-6}$	2.17	$1.70 \times 10^{-1}$	-0,41
ZINAP-03	63.03	45132	$3.22 \times 10^{-7}$	$1.83 \times 10^{-6}$	2.45	$1.76 \times 10^{-1}$	-0,297
UC-18	71.04	45101	$1.93 \times 10^{-7}$	$1.98 \times 10^{-6}$	2.89	$9.75 \times 10^{-2}$	-0,686
ATO-04	81.41	35.5	$3.23 \times 10^{-7}$	$1.43 \times 10^{-6}$	2.29	$2.26 \times 10^{-1}$	-0,345
SDN-20	49.43	45004	$4.06 \times 10^{-9}$	$1.92 \times 10^{-8}$	2.56	$2.11 \times 10^{-1}$	0,141*
EA-19	74.26	45186	$1.38 \times 10^{-8}$	$8.15 \times 10^{-8}$	4.15	$1.69 \times 10^{-1}$	-0,287
PIZ-12	39.14	44995	$1.05 \times 10^{-7}$	$1.12 \times 10^{-7}$	3.80	$9.38 \times 10^{-2}$	-0,056
TEP-15	60.51	4	$1.68 \times 10^{-7}$	$2.36 \times 10^{-6}$	15.13	$7.12 \times 10^{-2}$	0,518*

### Hidalgo

Estos cinco sitios se pueden agrupar en dos comportamientos tipo (ver figura 16). El primero de ellos agrupa los sitios Sierra de las Navajas, El-Abra y El-Pizarrín, cuyos ciclos de histéresis se asemejan (ver figuras 16b, 16c y 16d). El segundo comportamiento es exhibido por los sitios de Atopixco y Tepalzingo (figuras 16a y 16e), si bien no se asemejan tanto entre sí, poseen la peculiaridad de ser los sitios con mayor y menor coercitividad, respectivamente, de los cinco.

Atopixco (Ato). Las muestras poseen los valores de magnetización y de coercitividad más altos para Hidalgo. La morfología del ciclo sin corrección de pendiente paramagnética (curva roja) no dista significativamente de la curva ya corregida (azul) por lo que se descarta una abundancia de material paramagnético o de proporción SP. Este ciclo de histéresis llama la atención pues es el que mayor apertura posee, es decir, posee una irreversibilidad más notoria; a partir de los valores  $H_{cr}$  y  $H_c$  obtenidos en esta muestra (Ato 04) y el comportamiento asociado al diagrama FORC, puede pensarse en una contribución de

múltiples estados de dominio en transición, específicamente una mineralogía asociada maghemita y magnetita.

Este espécimen destaca por la geometría alargada de un pico central asociado a comportamiento SD, así como un alargamiento que tiende a valores de coercitividad mayores a lo largo del eje  $B_c$ . Se puede apreciar una apertura vertical entre las curvas, así como un pico central (morado) que se desplaza a valores de entre 0.02 y 0.04 T junto con una cola de coercitividad alta (0.12-0.16 T). Tales características además de lóbulos asimétricos que interceptan con el eje  $B_u$  hacia el cuadrante superior e inferior se relacionan a partículas con comportamiento vórtice sencillo.

*Sierra de las Navajas (SDN)*. Este espécimen muestra un comportamiento pobre en cuanto a respuesta ferromagnética se refiere. La curva del ciclo de histéresis presenta la curva sin corrección paramagnética (roja) como una línea recta y pendiente alta, lo que denota una contribución mayoritaria de material paramagnético. En menor medida, a pesar de tener una predominancia paramagnética, el ciclo con corrección de pendiente paramagnética (azul) posee una geometría que puede asociarse cualitativamente a un tipo de comportamientos PSD.

Por su parte, el diagrama FORC para esta muestra presenta una morfología difusa o con contornos errantes. Sin embargo, cabe destacar una cresta breve de bajas coercitividades que intercepta con el origen ( $B_c=0$ ), además de un pequeño pico que parece desprenderse en los valores de entre 20 y  $40 \times 10^{-3} T$ . A diferencia del resto, destaca por una resolución menor a los demás FORCs debido a una pobre construcción de las curvas concéntricas, así como del ruido alrededor de todo el gráfico.

Al comparar con la curva K-T, el ciclo de histéresis, así como la curva de Unmixing, se puede constatar el poco contenido de material ferromagnético o ferrimagnético. No obstante, en el diagrama de FORC, una breve cresta simétrica y centrada sobre el eje horizontal, además de expansiones verticales en los cuadrantes positivo (superior) e inferior (inferior) a partir del eje horizontal  $B_c$ .

*El-Abra (EA)*. Similar al comportamiento histerético de SDN 20, el ciclo que muestra el comportamiento para la muestra EA 19 presenta una diferencia significativa en los parámetros de magnetización ( $M_{rs}$  y  $M_s$ ; ver tabla 2). La contribución paramagnética predomina también en este ciclo, no obstante, se percibe una diferencia en los extremos cercanos a la saturación: tanto la cresta de magnetización positiva como negativa muestran

una trayectoria que sugiere un proceso más gradual o lento de saturación, además, en el origen del gráfico se percibe un ciclo (curva corregida) con irreversibilidad más pronunciada o un ensanchamiento del ciclo mayor. Lo anterior se asocia al tipo de ciclo 'cintura de avispa', aunque en proporciones minúsculas. En primera instancia, el diagrama de FORC sugiere una morfología típica de comportamientos PDS, asimismo, los valores de coercitividad con órdenes de magnitud mayor revelan una combinación implícita por la morfología. De tal manera que la función FORC de EA 19 presenta un alargamiento paralelo al eje horizontal y un achatamiento paralelo al eje vertical que, a diferencia del de Ato 04, no se muestra de manera completa, parece cortado por la mitad desde el origen. Más aún, se observa un pico central por debajo de 0.02 mT, mientras que Ato 04 dobla los valores de coercitividad llegando casi a 0.04 mT. Además, ocurre una cola larga que se extiende sobre todo el gráfico, más allá de 0.14 T, lo que sugiere una combinación posible de fases magnéticas muy similares en sus estados magnéticos que poseen diferentes coercitividades en fracciones mínimas dentro de la muestra.

*El-Pizarrín (Piz).* El tercer sitio muestra comportamiento donde la contribución de material paramagnético es ligeramente menor. Por otro lado, a pesar de que este ciclo posee una morfología asociada a valores de saturación mayores, el área dentro del ciclo es menor a los sitios de El-Abra y SDN, por lo que se asocia un contenido mínimo de material ferromagnético. además de que puede tender a partículas MD y/o vórtex.

El diagrama FORC reúne las características típicas de estado de dominio MD, como una señal dominante de expansión vertical cercana al origen, una pequeña cola o lóbulo central que se desplaza al extremo de mayor coercitividad a lo largo del eje  $B_U$ . No obstante, se aprecia un pico que se corta al interceptar con el eje vertical.

*Tepalzingo (Tep).* La geometría de los ciclos de esta muestra puede asociarse a un contenido de partículas magnéticas predominantemente MD. La diferencia entre el ciclo corregido (azul) y el ciclo sin corregir (rojo) en términos de la magnetización adquirida es poca, entre ambos no hay demasiada apertura, por lo que el aporte de fases paramagnéticas para este proceso de histéresis es mínimo. Los valores de la razón  $M_{rs}/M_s$  y coercitividad, junto con el espectro del diagrama FORC respaldan una contribución predominante de partículas multi-dominio (MD).

Con más detalle, el diagrama FORC para Tep 15 presenta una forma característica de estado de dominio MD. A diferencia de Piz 12, la expansión vertical de las curvas que lo forman es más pronunciada y se aprecia un pico con mayor extensión vertical. La cola de altas coercitividads se extiende hasta llegar a  $0.08T$  y está desplazada ligeramente por encima del eje  $B_U$ .

Con base en los diagramas de Unmix, se puede realizar una aproximación que complementa la información sobre la mineralogía magnética presente a partir de valores de coercitividad. Para el caso de EA-19 se muestra una dispersión de datos de tal manera que es imposible asociarla a alguna curva modelo para interpretar una distribución de coercitividad coherente (ver figura 16m). Mismo caso es para la curva de SDN-20. Estos dos casos se asocian a algún error de medición durante la obtención de las curvas IRM. En el caso de Tep, se puede apreciar la contribución total de una sola componente magnética que debido a los valores donde la media de tal curva intersecta con el eje horizontal, se asocian a magnetita (figura 16o).

Acorde a los diagramas K-T, tanto las curvas de Piz 12 y Ato 04 muestran una contribución dividida en dos fases magnéticas. Por el lado de Piz 12 se observa una contribución significativa para una segunda componente con mayor coercitividad (curva colores morados figura 16k). Ato 04 muestra una contribución donde las coercitividads no difieren tanto, sin embargo, se puede apreciar que las curvas presentan un sesgo a la izquierda y a la derecha (morado y azul respectivamente). El sesgo que presenta la curva morada puede asociarse a interacciones entre partículas magnéticas. Para el caso del sesgo en la curva azul, puede ser un indicativo de mineralogía mezclada en una sola componente (Maxbauer *et al.*, 2016; Muxworthy *et al.*, 2004).

De estos sitios, la variación en la distribución de coercitividad (eje vertical) es mucho más baja para Piz y SDN (figuras 16n y 16i), seguido de Tep y finalmente Ato (Ver figuras 16o y 16k). Los valores logarítmicos de coercitividad (eje horizontal) son aproximadamente los mismos. EA 19 se descarta debido al ruido alto que impide el análisis (ver figura 16m).

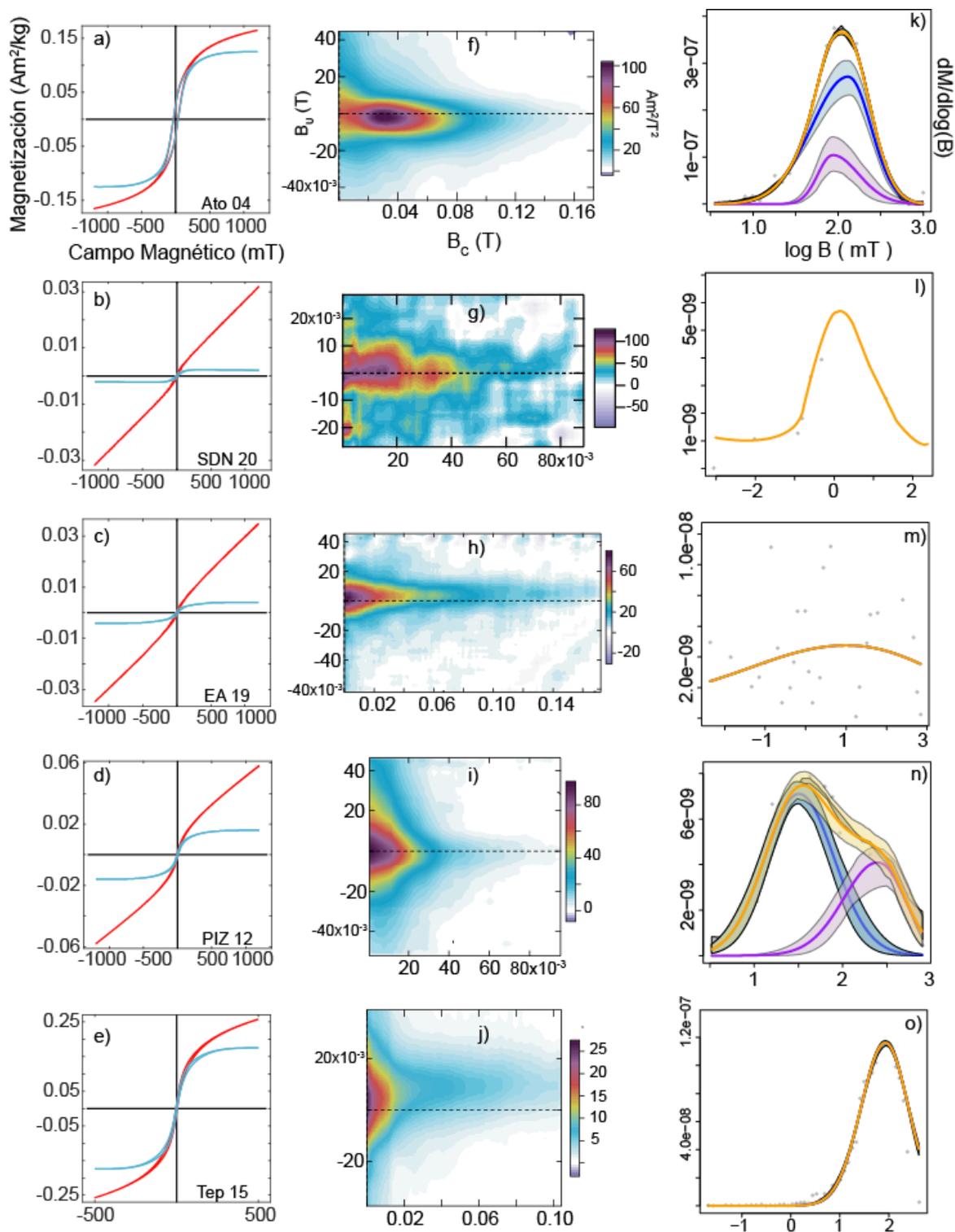


Figura 16. Propiedades magnéticas dependientes de aplicación de campo magnético: a-e) ciclos de histéresis; f-j) diagramas FORC; k-o) curvas de Unmix. Estado de Hidalgo. Las curvas azul y morada en k y l representan dos componentes distintas.

### *Puebla*

*Oyameles (Oyam)*. De los 4 sitios, este presenta parámetros de histéresis con valores más altos además de que el ciclo de histéresis en este caso es distinto, pues visualmente se aprecia un ciclo con mayor coercitividad, además de que satura a menores valores que sus homólogos de Zaragoza o Ixtetal. Es el segundo espécimen con mayor coercitividad, lo que se expresa de manera más explícita en el diagrama FORC correspondiente (figura 17 a, e i). Ante esta aparente disparidad de comportamiento con una magnetización de saturación menor, pero mayor coercitividad, se deduce un comportamiento asociado a transiciones de dominio con partículas magnéticas de mayor tamaño. Este diagrama presenta una forma que contrasta con los dos sitios reportados anteriormente para Puebla. Se destaca la forma de contornos concéntricos y un pico central desplazado entre 0.02 y 0.04 T. Esta morfología se asocia a comportamiento vórtice (Bilardello *et al.*, 2020) Se aprecia una cresta central pequeña con ensanchamiento vertical por debajo de la horizontal  $B_U=0$ .

*3-Cabezas (TC)*. Este sitio posee los valores de coercitividad más altos, así como los valores mínimos de magnetización de saturación. Tal efecto se relaciona a una combinación de poblaciones SP/MD. También, el hecho de que no esté presente una morfología asociada a distintas fases magnéticas, como por ejemplo la cintura de avispa, sugiere rangos específicos de dominios de partículas, SP/SD (Tauxe, 1996).

La distribución de curvas FORC permite apreciar una morfología asociada a comportamientos PSD. A lo largo del eje  $B_c$  existe un comportamiento de partículas asociadas a tamaños SD, esto es, una cresta central que en el origen sobrepasa  $60 \times 10^{-3}$ . Además, se observa una expansión vertical considerable, por lo que se descarta tipo SD uniaxial debido a interacciones magnetostáticas. Aunado a lo anterior, esta cresta que señala la presencia de SD está desplazada a la zona de bajas coercitividades, tomando en cuenta este factor y el hecho de que hay una asimetría en las intersecciones verticales en cuadrantes inferior y superior con el eje vertical, así como una cola a la derecha de  $B_c$  con expansión considerable, es posible constatar un comportamiento PSD.

Los gráficos de curvas Unmix de Puebla están dominados por una sola componente magnética (figura 16i-16l). TC-04 es el sitio que menores valores de distribución posee. Zaa-07 e Ixtet 09 están dentro del mismo rango de valores, esto implica proporciones relativas similares para ambos sitios. Sin embargo, la media de la curva gaussiana para Ixtet interseca en valores ligeramente menores. En el caso de Zaa 07, la distribución de

coercitividad únicamente muestra una componente magnética, lo que no se vincula con las dos  $T_C$  registradas en su curva K-T.

Oyameles igualmente posee una contribución magnética de una sola componente además de que los valores de coercitividad asociados son similares a los de TC 04, pero con mayores valores en la distribución (eje vertical).

*Ixtetal (Ixtet)*. Este sitio muestra un comportamiento muy similar al de Zaragoza. La curva de histéresis para la muestra Ixtet 09 es aún más delgada. Por otro lado, se destaca el hecho de que es la curva para Puebla que menor contribución paramagnética posee.

A partir del diagrama FORC es posible constatar la presencia de partículas con estados de dominio PSD. De manera similar a Zaa 07, la presencia de un pico central desplazado hacia el origen y la asimetría sutil de lóbulos en el cuadrante superior e inferior, así como la presencia de una cresta ensanchada que se desplaza hacia el extremo derecho de coercitividades señalan un comportamiento PSD. (Ver figuras 17c, 17g)

Para el caso del espectro de Unmix, se aprecia una sola componente contribuyente a la magnetización total (Figura 17k).

*Zaragoza (Zaa)*. Este ciclo histerético posee una geometría bastante minimizada, esto es, la reversibilidad no es notable en el gráfico. El área generada entre la curva corregida y el ciclo sin tratamiento (azul y rojo, respectivamente), es mínima, por lo que se asume una contribución predominante de material ferromagnético en la muestra. Igualmente, en el diagrama FORC asociado (ver figura 16) se observa una morfología característica de comportamiento PSD. A pesar de esto y de los valores de los parámetros de histéresis, se puede constatar a partir de este diagrama un comportamiento tipo vórtice (Roberts *et al.*, 2017; Bilardello *et al.*, 2020).

La asimetría acostumbrada en MD no se presenta pues los lóbulos formados en los cuadrantes inferior y superior interceptan en diferentes valores del eje  $B_U$  en lugar de expandirse con una inclinación elevada sobre dicho eje. Igualmente, se observa un pico central con contornos en  $B_c=0$  o cercano al origen.

Junto con el valor para el radio de magnetización ( $M_{rs}/M_s$ ), se redondea la idea de contenido PSD, no obstante, según el gráfico K-T que sugiere un contenido de TMs pobre en  $T_i$ , por lo que este comportamiento queda eclipsado en el experimento de histéresis.

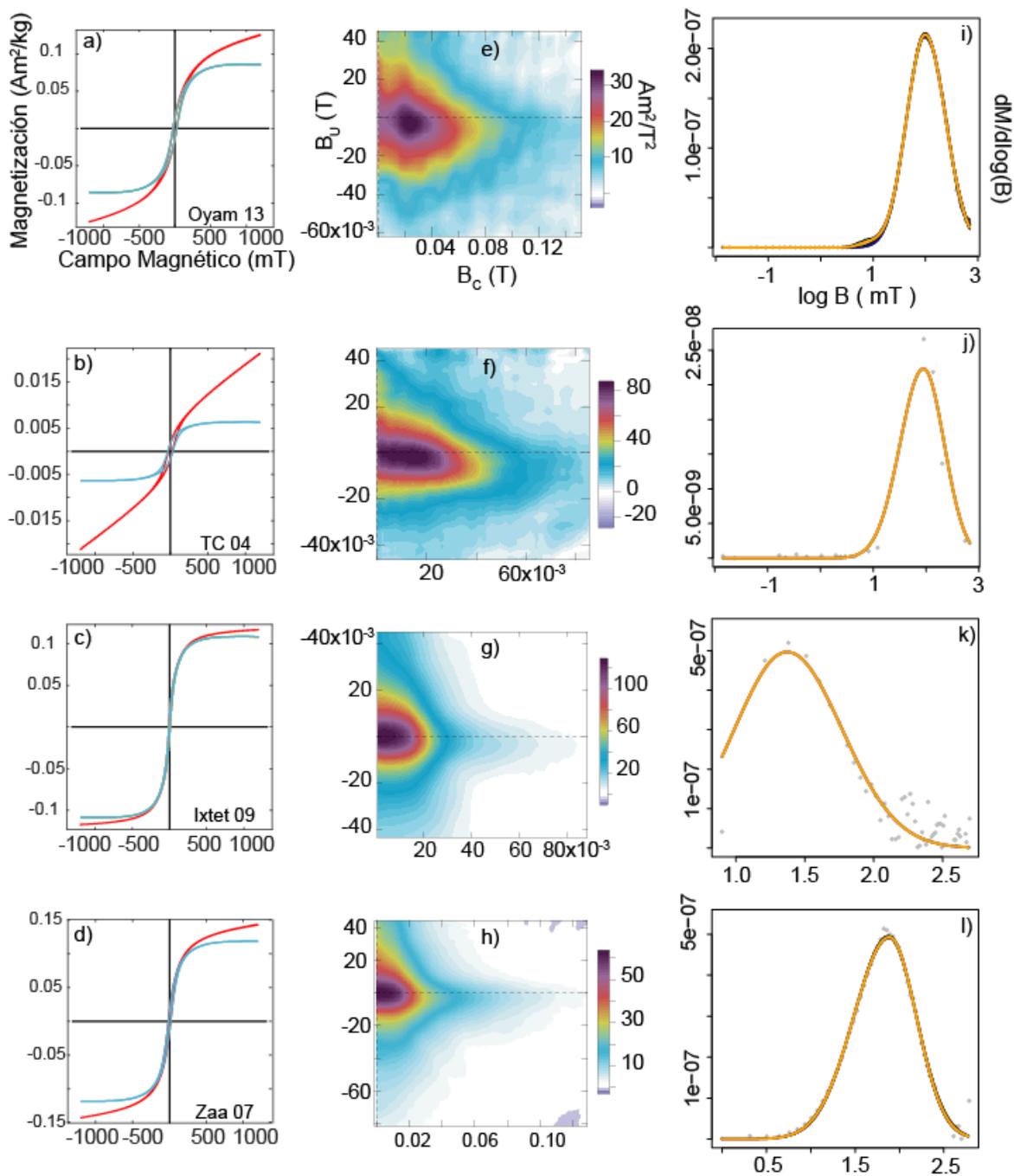


Figura 17. Propiedades magnéticas dependientes de aplicación de campo magnético para el Estado de Puebla.

#### Estado de México

Buenavista (Bue). El ciclo histerético de la muestra de este sitio presenta valores de saturación similares a Ix 06. En este sentido, se puede decir que hay un comportamiento

donde también predominan mezclas de partículas magnéticas entre rangos de SD y MD (Figura 18a y 18c). Sin embargo, al visualizar el diagrama FORC correspondiente, se puede constatar una ausencia de comportamientos asociados a la presencia de partículas SP. Las características del FORC-Bue 15 sugieren una combinación de estados de dominio SD que contiene interacciones magnetostáticas y PSD. Estas características, para el primer caso, son un pico central con contornos cercanos que presentan una elongación sobre la horizontal ( $B_U=0$ ) y están cercanos entre sí, además de una ligera expansión vertical, señal de interacciones presentes. Igualmente, se destaca un pico que se aleja del origen (0.02T).

Por el lado de características PSD, observamos un pico que parece ser el punto de intersección entre la cresta central que pasa los 0.10T; la cresta vertical con valores positivos y su homóloga en el cuadrante inferior (Figura 18d). Este comportamiento se asocia a la existencia de dos tipos de dominio magnético (Bilardello *et al.*, 2021).

En el caso del diagrama Unmix, es posible ver dos presuntas componentes magnéticas. La que contribuye de mayor manera es la curva azul, que se lleva la gran parte del total de magnetización dentro del espécimen, acorde con resultado dependiente de temperatura (Figura 13-I). No obstante, aparece una ligera contribución de una segunda componente representada por una curva con gran dispersión color lila (Figura 18g).

*Ixtepec (Ix)*. En el ciclo de este sitio, la morfología presenta una irreversibilidad más evidente tanto para el ciclo sin corrección como el ya corregido. La contribución paramagnética es mínima por lo que se infiere una contribución principal de poblaciones SD en combinación contribuyente con MD (Figura 18b); es el único de los tres sitios que satura a valores más altos con respecto a los demás resultados de este trabajo (más de 0.3 Am<sup>2</sup>/kg). También resalta un comportamiento sutil tipo 'goose-necked' o cuello de cisne que está asociado a presencia de tamaños de partículas magnéticas SD con SP de magnetita y en menor medida, hematita.

Para el caso del diagrama FORC, la morfología salta a la vista pues la señal predominante es típica de un estado de dominio SD cuya cresta central se aleja del origen y está ligeramente desplazada hacia valores negativos del cuadrante inferior. La expansión vertical con respecto al eje  $B_U$  es apreciable por lo que se asocia la presencia de interacciones magnetostáticas. Además, a partir de valores menores a 0.05T se aprecian rastros característicos de comportamientos PSD adicionales pues hay formación de lóbulos asimétricos en ambos cuadrantes además de un pico incipiente en 0.025T (Ver figura 18c).

La curva Unmix, al igual que los resultados de Bue15K-T sugieren una única contribución de fases magnéticas, como puede ser magnetita. No obstante, el espectro Unmix sugiere la presencia de dos componentes magnéticas, que bien puede ser una expresión mínima de titanomagnetita empobrecida en Ti.

Malpaís (Mal). El ciclo de la muestra Mal 11 se asocia igualmente a una combinación de fases magneto-mineralógicas SD/MD. Este ciclo presenta un comportamiento donde la saturación se da a valores menores con respecto a IX 06, igualmente, las dimensiones del ciclo y el área dentro de la curva son menores. Lo anterior se asocia a un menor contenido de material ferromagnético (Volk *et al.*, 2017). La contribución paramagnética también es pequeña en este caso, además de que las curvas poseen un ruido asociado posiblemente a predominancia de partículas magnéticas que tienden comportarse como MD (Figura 18c).

El diagrama FORC presenta una morfología característica de estado de dominio PSD. Se pueden apreciar, en ambos cuadrantes, los lóbulos asimétricos que cortan al eje  $B_U=0$  en diferentes valores ( $40 \times 10^{-3}$  lado superior y  $20 \times 10^{-3}$  lado inferior) aunado a un tercer lóbulo o cresta con mayor amplitud vertical que llega a 0.12T. De igual importancia es la presencia de un pico cuyo centro está en 0.02T sobre el eje  $B_C$  con paredes o contornos que presentan cierto achatamiento sobre la horizontal. Este comportamiento se asocia a la presencia de SD con interacciones magnéticas (Figura 18f).

Hay dos casos destacables en los comportamientos de los sitios del Estado de México. Las curvas Unmix de Bue 15 e Ix 06 presentan dos fases muy similares en los valores de coercitividad. En Bue 15 observamos una componente (morada) con una proporción relativa mínima, por lo que la contribución asociada es pequeña. La fase azul posee la gran mayoría de contribución magnética según el modelo de distribución para esta curva (línea anaranjada). Tales componentes podrían ser magnetita (componente azul) y trazas de titanomagnetita (componente morada) (Ver figuras 18g y 18h). En contraste, la distribución de coercitividad para Ix 06 muestra dos componentes con valores medios más parecidos. Con base en esto y el comportamiento asociado del diagrama FORC y la curva K-T ambas componentes (morada y azul) pueden ser tamaños de partícula con distinto estado de dominio.

Por otro lado, la curva Unmix de Mal 11 muestra una sola componente que contribuye a la magnetización de la muestra. Al comparar igualmente la curva K-T y el diagrama FORC (ver figuras 13 y 18) esta curva de Unmix puede asociarse también a un tamaño de partícula cercano a SD.

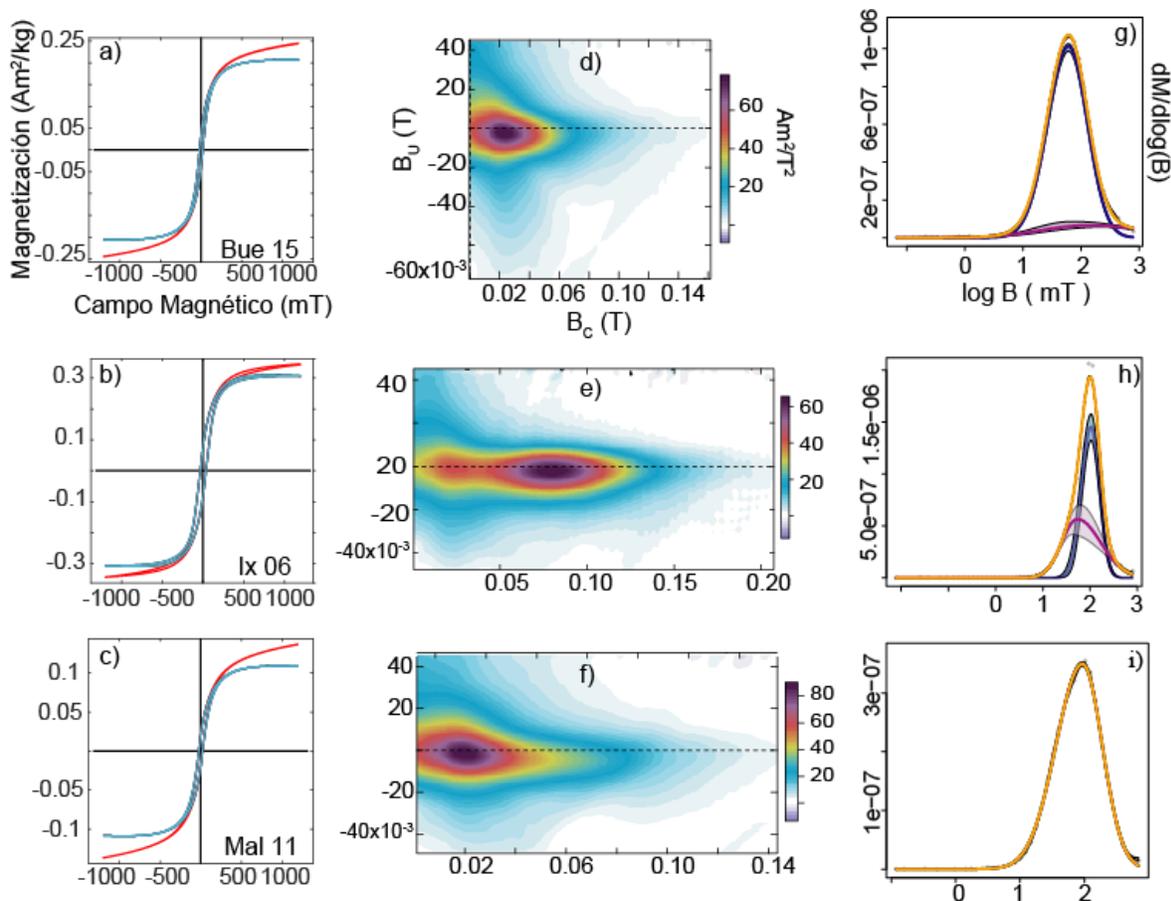


Figura 18. Propiedades magnéticas dependientes de aplicación de campo magnético para los sitios del estado de México Buenavista, Ixtepec y Malpaís.

### Michoacán

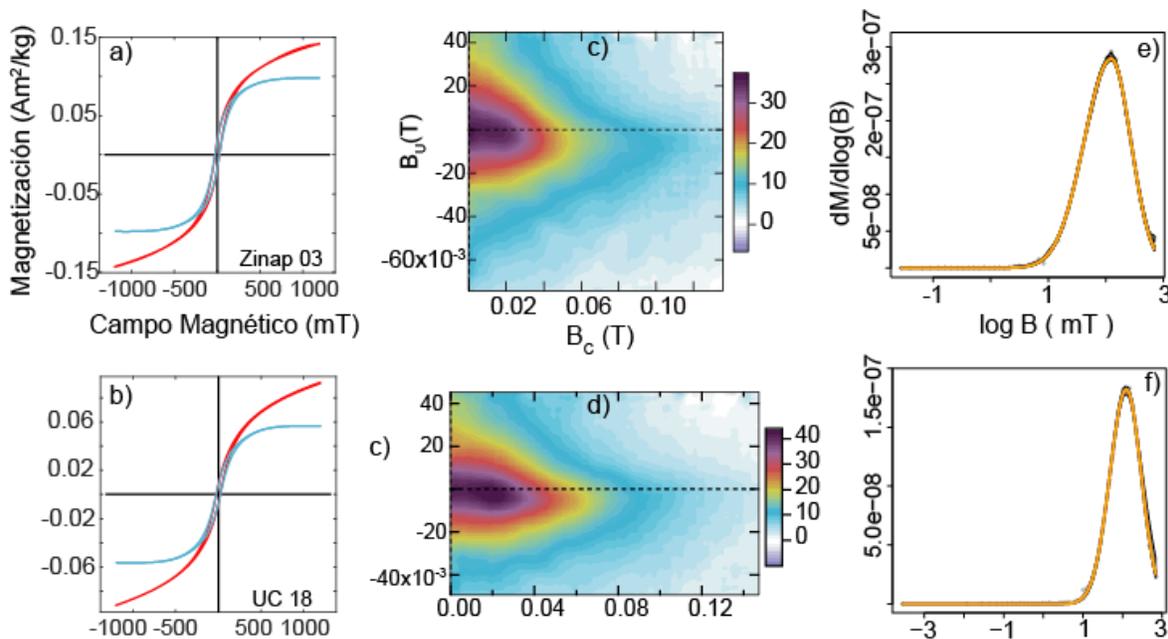
Zinapécuaro (Zinap). Los parámetros de histéresis de la muestra Zinap 03 en el diagrama Day, sugieren contenido PDS de partículas magnéticas, con una menor presencia de SP. La contribución de material paramagnético es alrededor del 25% y lo que predomina son los ferromagnéticos (Figura 19a).

En cuanto al diagrama FORC, podemos observar una combinación de estados de dominio PSD y MD que pueden ser diferenciados. Aunque sutilmente, es posible observar un comportamiento asimétrico en la distribución vertical ( $B_u$ ) pues las intersecciones de las curvas son en distintos valores. Igualmente, la presencia de un pico central con valores fuertemente detectados (tonos morados) sugieren una configuración vórtex o PSD dentro de esta muestra. Para soportar la aseveración de un contenido MD casi dominante, se destaca una tendencia a la simetría en este diagrama FORC, una incipiente cola que tiende hacia el extremo derecho del diagrama y alcanza el valor de 0.10T característica de estados

MD así como un desplazamiento ligero por debajo del eje horizontal  $B_U=0$  (Roberts *et al.*, 2000) (Figura 19c).

Ucareo (Uc). El ciclo de histéresis para UC 18 muestra un comportamiento donde la saturación que presenta yace por debajo de la mitad de los presentados en Zinap 03. A pesar de ello, la morfología del ciclo tanto corregido como sin corregir, es muy parecida. La contribución paramagnética igual sugiere una similitud con Zinapécuaro. El elemento que contrasta estos dos sitios es el valor de la magnetización de saturación (ver tabla 2, figura 19b). El diagrama FORC de esta muestra evidencia un estado de dominio PDS. Es apreciable una forma que es más alargada con respecto a la horizontal, además de que se extiende hacia valores mayores de coercitividad que Zinap 03. En cuanto al comportamiento  $B_U$ , se puede ver una asimetría marcada entre los cuadrantes superior e inferior. El pico característico de los PDS se encuentra alargado y parece desplazarse hacia la parte derecha del diagrama (Figura 19d).

Las curvas Unmix calculadas para estos dos sitios permiten diferenciar con más detalles, a pesar de que la diferencia a través de la distribución de coercitividad es mínima, se puede observar que los valores de Zinap 03 son poco más del doble con respecto a Uc 18 (ver figura 18). Ambos sitios poseen una contribución única de una sola componente y los valores medios para cada caso poseen valores muy parecidos (Ver figuras 19e y 19f).



*Figura 19. Propiedades magnéticas dependientes de aplicación de campo magnético, sitios de Michoacán.*

### **Obsidianas arqueológicas e ‘in situ’ no-orientadas**

En este apartado se describen los resultados de medir las propiedades dependientes de la aplicación de campos magnéticos en pequeños fragmentos (menores a  $2\text{cm}^3$ ) de obsidiana arqueológica. Estas “Lascas” de obsidiana también fueron proporcionadas por el Dr. Guillermo Acosta y el Maestro Víctor García (IIA, UNAM). Cada fragmento reportado aquí fue tomado de distintas capas y niveles en una zona de excavación en la CDMX. Para mayor información de estudios paralelos en estos fragmentos ver Acosta Ochoa, 2014; 2015; García, 2018 y Rivera González, 2019. Nota: El uso de diferentes colores en los diagramas FORC mostrados no son de importancia para la interpretación de este trabajo.

*EJAC 097 (Capa III Nivel 1).* La curva de histéresis para este fragmento es el que mayor magnetización posee. El ciclo corregido (azul) no presenta un ensanchamiento importante, además de que la contribución paramagnética es poca. Determinar una interacción mayor con base en la morfología del ciclo de histéresis es complicado debido a que éste, y el de los siguientes fragmentos arqueológicos están muy constreñidos (Figura 20a).

El comportamiento apreciable en el diagrama FORC para esta muestra sugiere la ocurrencia de partículas magnéticas con comportamiento PSD. Las características tipo, al igual que los diagramas FORC descritos anteriormente con el mismo comportamiento, incluyen un pico central alrededor del eje horizontal  $B_U=0$  desplazado hacia la derecha del gráfico en  $0.02\text{T}$ . Además, se aprecia una expansión vertical asociada a la ocurrencia de interacciones magnetostáticas presentes. La segunda característica de este diagrama es el par de lóbulos que lo hacen ver verticalmente asimétrico y que cortan en distintos valores tanto en el cuadrante superior como en el inferior además de un tercer lóbulo o cola que sucede a valores mayores de coercitividad, llegando a valores de entre  $0.06\text{-}0.08\text{T}$  (figura 20a). El diagrama Unmix muestra claramente la contribución de una sola componente magnética cuya proporción es el total de contribución, además de que se asocia a magnetita.

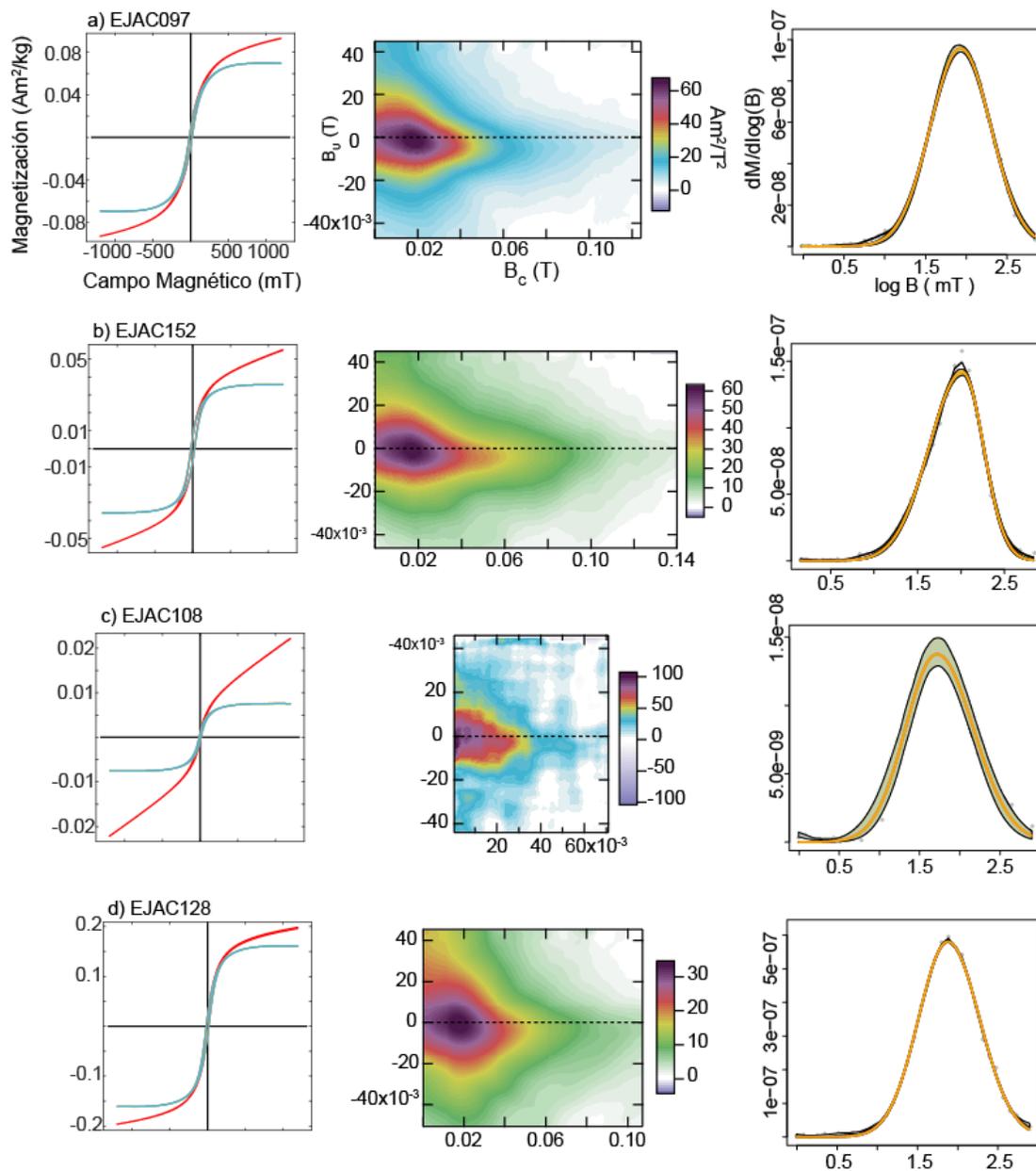
*EJAC152 (Capa III Nivel 2).* El ciclo de histéresis expresa una mayor contribución ferromagnética que EJAC097. El rango de saturación de la magnetización es menor, no obstante, parece tener una mayor abertura el área dentro de este ciclo corregido (ciclo azul, figura 20b).

El diagrama FORC muestra una configuración magnética muy similar al anterior (Ver figura 20b) con un pico central que se encuentra desplazado hacia la derecha del diagrama en 0.02T. Las interacciones magnetostáticas ocurren también en esta muestra además de que los valores donde cortan los lóbulos superior e inferior de manera asimétrica parecen cortar con el eje vertical en valores similares. La morfología de esta muestra y de la anterior sugieren un comportamiento parecido, no obstante, la característica que los diferencia es la cola de coercitividad mayor que, a diferencia de EJAC097, ésta sobrepasa los 0.08T. El detalle diferencial mencionado anteriormente se corrobora con una mayor variación en la distribución de coercitividad, esta variación puede asociarse a una contribución aparente de diferentes tamaños de partícula. Además, la curva presenta un ligero sesgo a la derecha (ver figura 20b).

*EJAC108 (Capa IV Nivel 1).* El gráfico de histéresis de esta muestra sugiere un contenido de material ferromagnético incipiente, además de una contribución paramagnética mayor, con respecto a las otras tres obsidias arqueológicas. La mínima presencia de contenido magnético se constata también en el diagrama FORC que es visualmente difuso; la configuración de un pico, las curvas concéntricas alrededor y una posible cola de coercitividad mayor se ven altamente distorsionadas, por lo que es complicado interpretar un comportamiento asociado a tamaños de partícula magnética existentes (figura 20c). En términos de la coercitividad, es posible ver un modelo que ajusta a una sola componente mayoritaria, presumiblemente puede ser magnetita. La variación tan pobre para la curva Unmix de este fragmento soporta un mínimo contenido de relevancia magnética (figura 20c).

*EJAC128 (Capa IV Nivel 2).* Para el caso de esta muestra, podemos ver que es el ciclo con mayor saturación, pues el ciclo corregido alcanza a saturar en valores de magnetización de más del doble que los otros fragmentos. Además, como cabría esperar, la contribución paramagnética es mínima. A pesar de lo anterior, este ciclo también es complicado de interpretar a partir de la forma. Derivado de su diagrama FORC, el comportamiento es muy similar a los diagramas asociados a estados de dominio magnético PSD o con combinaciones de distintos tamaños, como la mayoría descritos en este trabajo. Sin embargo, es importante destacar las señales sutiles que diferencian el comportamiento de esta muestra de un mero PSD como lo es el pico central y ensanchado paralelamente tanto al eje vertical como el horizontal (comparar figuras 16, 17 y 18). Alrededor de este pico, en

valores de 0.020T y con una geometría redonda, también contrastan las curvas concéntricas alrededor de este pico redondeado. Similar a los PDS, se aprecian tres lóbulos incipientes, dos que cortan en valores distintos el cuadrante superior e inferior y, un tercero que se manifiesta como cola incipientemente sobre el eje horizontal  $B_U=0$  que llega a valores de 0.08T (ver figura 20d), formando una geometría distinta a los comportamientos asociados a PSD, al igual que el diagrama FORC de Oyam 13, y que pueden asociarse a estados SV (Bilardello *et al.*, 2021). El espectro de coercitividad, posee los valores más altos de variación, por lo que se asocia, de manera similar a los demás fragmentos, un contenido mayoritario de magnetita.



*Figura 20. Diagramas FORC pertenecientes a cuatro fragmentos arqueológicos representantes de Capa III N1 (EJAC 097); Capa III N2 (EJAC 152); Capa IV N1 ((EJAC 108); Capa IV N2 (EJAC 128).*

*OBS PERL.* Esta muestra presenta un ciclo de histéresis dominado por una contribución paramagnética mayoritaria similar a los ciclos de las figuras 16b y 16c. El ciclo corregido dista ampliamente del no corregido. Además, vuelve a observarse un ciclo de histéresis donde la curva de color rojo parece una línea recta. Se deduce de lo anterior una cantidad ínfima de material ferromagnético (Figura 21a).

El diagrama FORC asociado a la muestra de obsidiana perlítica presenta un incipiente pico ubicado en el origen del gráfico (Ver figura 21a). La nitidez de este pico y del espectro verde amarillo de la cola central que se desplaza hasta los  $20 \times 10^{-3} \text{T}$  sugiere la presencia de dominios SD con interacción magnetostática además de una posible contribución de SP (deducido por la señal difusa pegado al eje vertical en el lado inferior izquierdo).

La curva de Unmix para este fragmento presenta los valores más pequeños de la totalidad de curvas en este trabajo. Además, es posible observar algunos puntos que salen del modelo de distribución para este caso en particular. Omitiendo el ruido dentro del espectro IRM, se puede observar la presencia de una contribución magnética cuya media corta en valores comunes reportados en este estudio (ver figura 21a).

*OBS MULTICOLOR.* El ciclo de histéresis asociado a este fragmento de obsidiana presenta una contribución mayoritaria de minerales ferromagnéticos; la contribución paramagnética establecida a partir de la diferencia entre el ciclo corregido y no corregido es significativamente pequeña. Igualmente, es posible observar una saturación que alcanza valores muy por encima de los demás fragmentos in situ (Comparar con figuras 21b con 21a, 21c y 21d).

El diagrama Forc, es un caso único donde se muestra una combinación de dominios magnéticos totalmente diferentes. La primera característica de este diagrama es una cresta que se extiende de manera paralela al eje horizontal hasta valores de 0.15T. Esta morfología se asocia a contribuciones de tamaños de partículas SD uniaxiales pues en este caso, la expansión vertical típica de interacciones magnéticas es deleznable (e.g. Roberts et al., 2000; Bilardello et al., 2019). Además, aunque someramente, es posible constatar un valor de cresta medio, cuyo valor de coercitividad asociado es de 0.75T (Ver figura 21b). Al mismo tiempo, desplazado a la zona de bajas coercitividades (lado izquierdo), es posible

observar un comportamiento típico MD donde se aprecian las expansiones verticales de las curvas concéntricas y un ligero deslizamiento del centro hacia el cuadrante superior (figura 21b). Con base en los valores de coercitividad asociados a las señales tipo MD y SD, se asocia la presencia de magnetita con tendencias a MD, y para el caso de los valores de 0.15T, una contribución de hematita. El gráfico Unmix corrobora la contribución de dos fases magnéticas distintas, donde la componente azul predomina sobre la segunda componente de mayor dispersión y menor proporción color morado (figura 21b). Con base en estos valores de coercitividad puede constatar una proporción modal mínima de hematita.

*OBS PMZ.* La muestra de obsidiana extraída de una matriz de pómez exhibe un ciclo de histéresis con un área muy pequeña dentro del ciclo, igualmente, con pequeña contribución paramagnética (Figura 21c). En cuanto al diagrama FORC, las señales asimétricas típicas de comportamiento PSD están presentes. Es posible observar características asociadas a partículas con estado de dominio SD pues se ve una tendencia de alargamiento hacia valores de mayor coercitividad que, en este caso, llega aproximadamente a los 0.05T. (Figura 21c). La presencia de este pico, al igual que en la mayoría de los comportamientos de las obsidias estudiadas, se asocian a un comportamiento MV o multi-vórtex que suelen presentar parámetros de histéresis asociados a estados de dominio MD (Bilardello *et al.*, 2020).

El gráfico Unmix muestra dos componentes magnéticas donde la curva color azul contribuye de manera predominante a la magnetización del espécimen. Al igual que la obsidiana multicolor, la componente de color morado tiene valores menores de coercitividad, por lo que se asocia un contenido de hematita mínimo frente a un contenido mayoritario de magnetita.

*OBS DOR.* Al igual que el ciclo de histéresis de OBS PERL, el ciclo propio de este fragmento presenta una contribución mayoritaria de material paramagnético. El ciclo corregido es demasiado pequeño para interpretar información adicional (figura 21d).

El diagrama FORC de esta muestra presenta un difuminado similar al de SDN 20 Y EJAC108 (figura 16g y 20c). A pesar de una similitud en la forma del espectro dentro del diagrama, en esta muestra no hay una formación clara de algún pico o cresta central como sí es apreciable en SDN 20 (figura 21d). La ausencia de esta característica, aunada a la malformación de este diagrama, no obstante, una nitidez clara en las curvas expandidas en el cuadrante superior e inferior, sugieren una incipiente formación de mineral magnético.

Finalmente, la curva Unmix es muy parecida a la de la figura 21a. La dispersión, morfología, orden de magnitud en la variación de magnetización (eje vertical) se asemejan entre este fragmento y la figura antes citada. Debido a esto se asocia una contribución de magnetita con variación de tamaño de partícula magnética, en concentraciones traza (figura 21d).

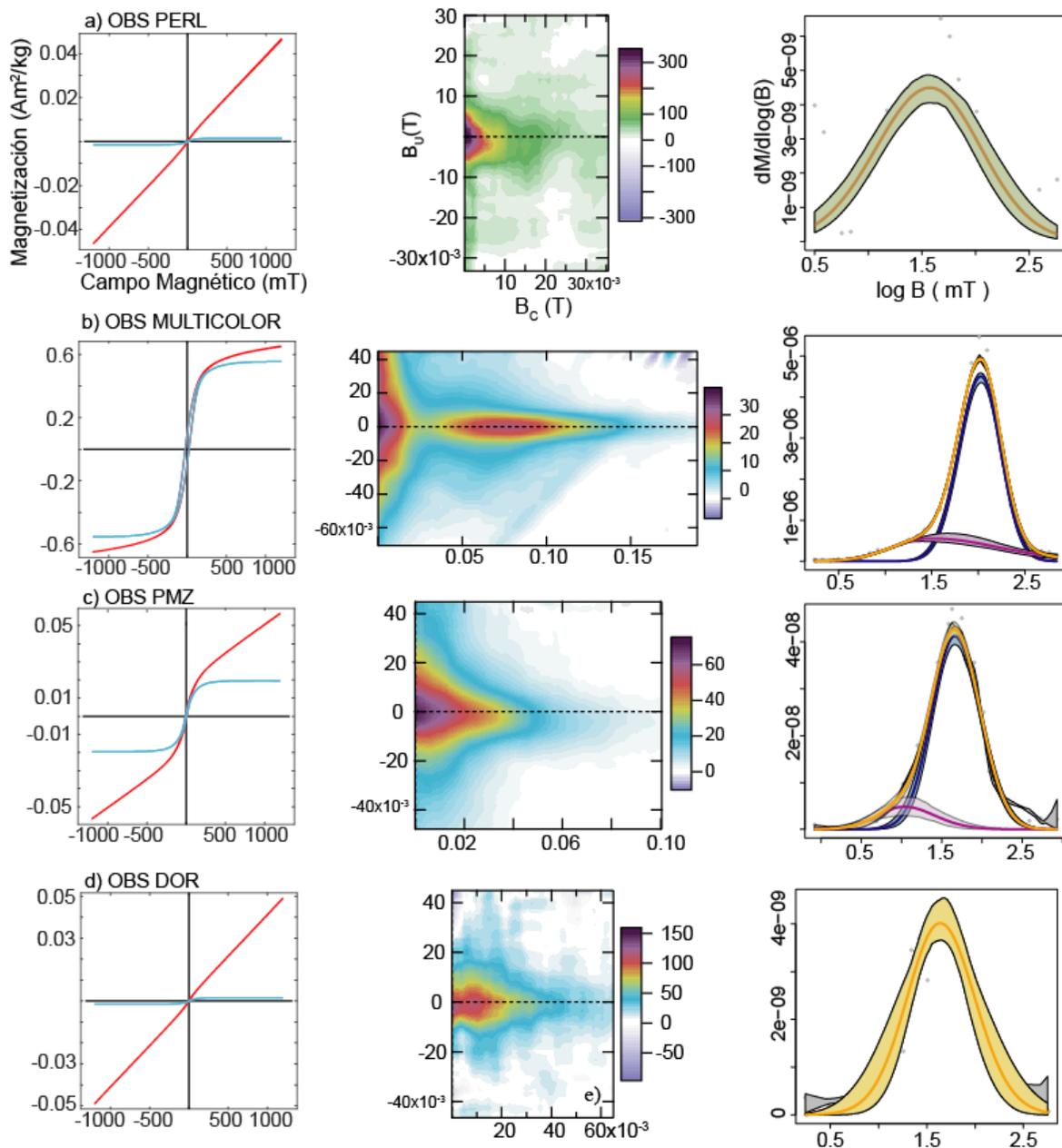


Figura 21. Resultados con dependencia de campo en los sitios *In situ* para los yacimientos de Hidalgo. El factor de suavizado (SF) para todos los diagramas FORC es 4.

### Diagramas de Day

El diagrama de Day-Dunlop (Dunlop, 2002) está construido a partir de los cocientes de los cuatro parámetros extraídos de los experimentos de histéresis y curvas backfield: en el eje vertical está la razón  $M_{rs}/M_s$  y en el eje horizontal  $H_{cr}/H_c$ .

Este diagrama es un elemento adicional a la interpretación sobre los tipos de partícula magnética y la vinculación con los estados de dominio para constatar si las muestras tienen posibilidad de tener alguna remanencia preservada de manera óptima (junto con los demás experimentos).

En la figura 22 parte superior se muestra el diagrama de Day con curvas de combinación teórica propuestas por Dunlop, 2002 correspondiente a los catorce sitios de obsidiana geológica trabajados. La escala logarítmica permite observar algunas tendencias lineales bajo las que se comportan algunos sitios (i.e., El-Abra, 3-Cabezas, Ixtetal y Zinapécuaro) así como agrupamientos no lineales entre muestras del mismo yacimiento o interflujo (e.g. Algunos especímenes de Atopixco, El-Abra, Pizarrín).

La gran mayoría de las muestras está dentro del rango PSD cuyas regiones son  $0.02 < M_{rs}/M_r < 0.5$  en el eje vertical y  $2 < H_{cr}/H_c < 5$ . Algunos especímenes se encuentran en la zona superior con tendencia a valores  $>5$ , siendo parte de El-Abra, SDN, Ixtetal y El-pizarrín. Este último sitio se divide en dos comportamientos: uno en la región PSD superior y otro en la zona inferior, más cercana a la zona multidominio MD.

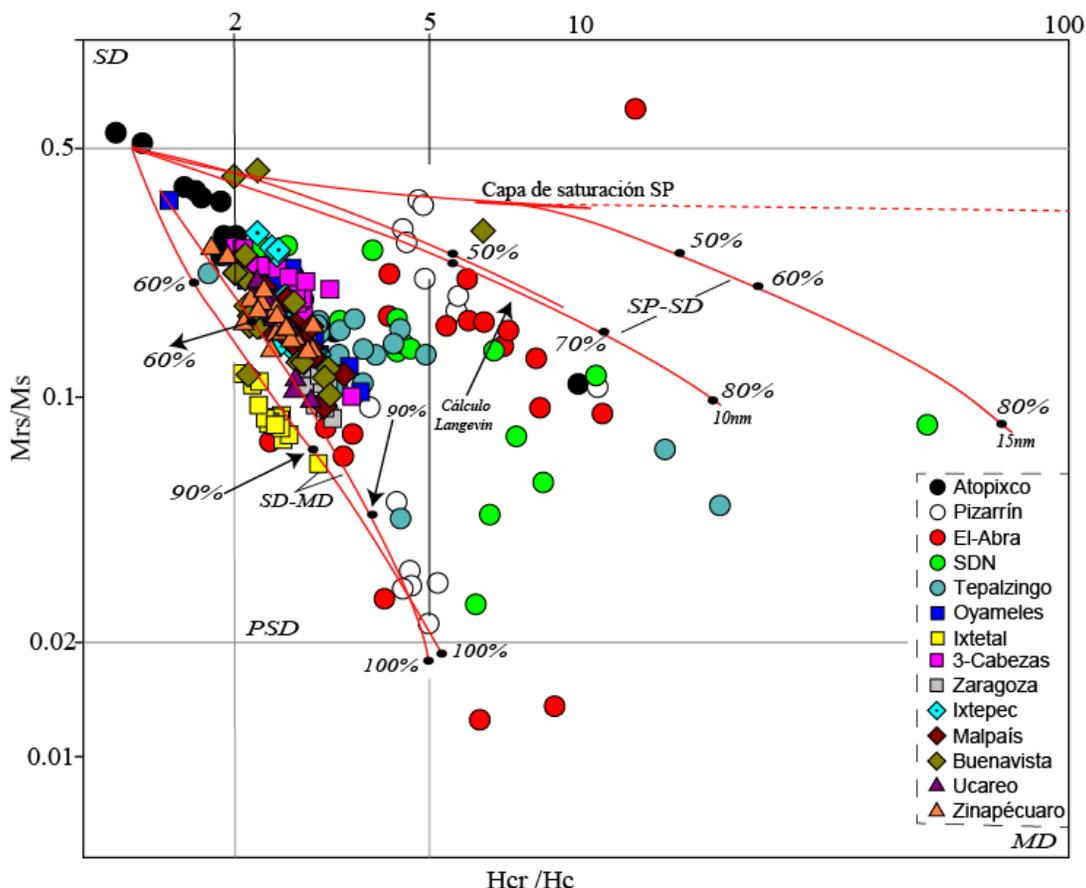


Figura 22. Diagrama de Day. Muestra todos los sitios geológicos de obsidiana y su posición asociada al estado de dominio magnético para cada espécimen de obsidiana, acorde a la teoría de Day et al., 1977 y Dunlop, 2002

#### Hidalgo y Michoacán

En la figura 23, se presentan los diagramas de Day para Hidalgo y para Michoacán de manera separada, y los correspondientes diagramas FORC referenciados según la zona del tamaño de partícula y estado magnético. Para el diagrama Day de Hidalgo se observa con mayor detalle que el sitio de Atopixco presenta un comportamiento lineal que se concentra en zonas de menor proporción de coercitividad pero mayor razón de magnetización. A partir de referenciar el diagrama FORC de Ato 04 puede pensarse en que otros especímenes podrían presentar un comportamiento SD.

Para el caso de SDN 20 (ver figura 15), el diagrama FORC no es claro y no se relaciona óptimamente al lugar dentro del que cae en la zona PSD. Mismo caso para Tepalzingo cuyo cociente de magnetización mayor a 15 lo deja fuera del gráfico de Day.

De manera particular, EA 19 se ubica en la zona aleada a combinaciones con superparamagnéticos (SP) y SD. El caso de Piz 12 es un MD según el diagrama FORC no obstante la referencia en Day se aleja según la razón de coercitividad.

El diagrama Day de Michoacán revela un agrupamiento entre ambos sitios que parecen complementar comportamientos de tendencia lineal. Esto se redondea con ambos FORCs y curvas K-T que emulan un comportamiento similar.

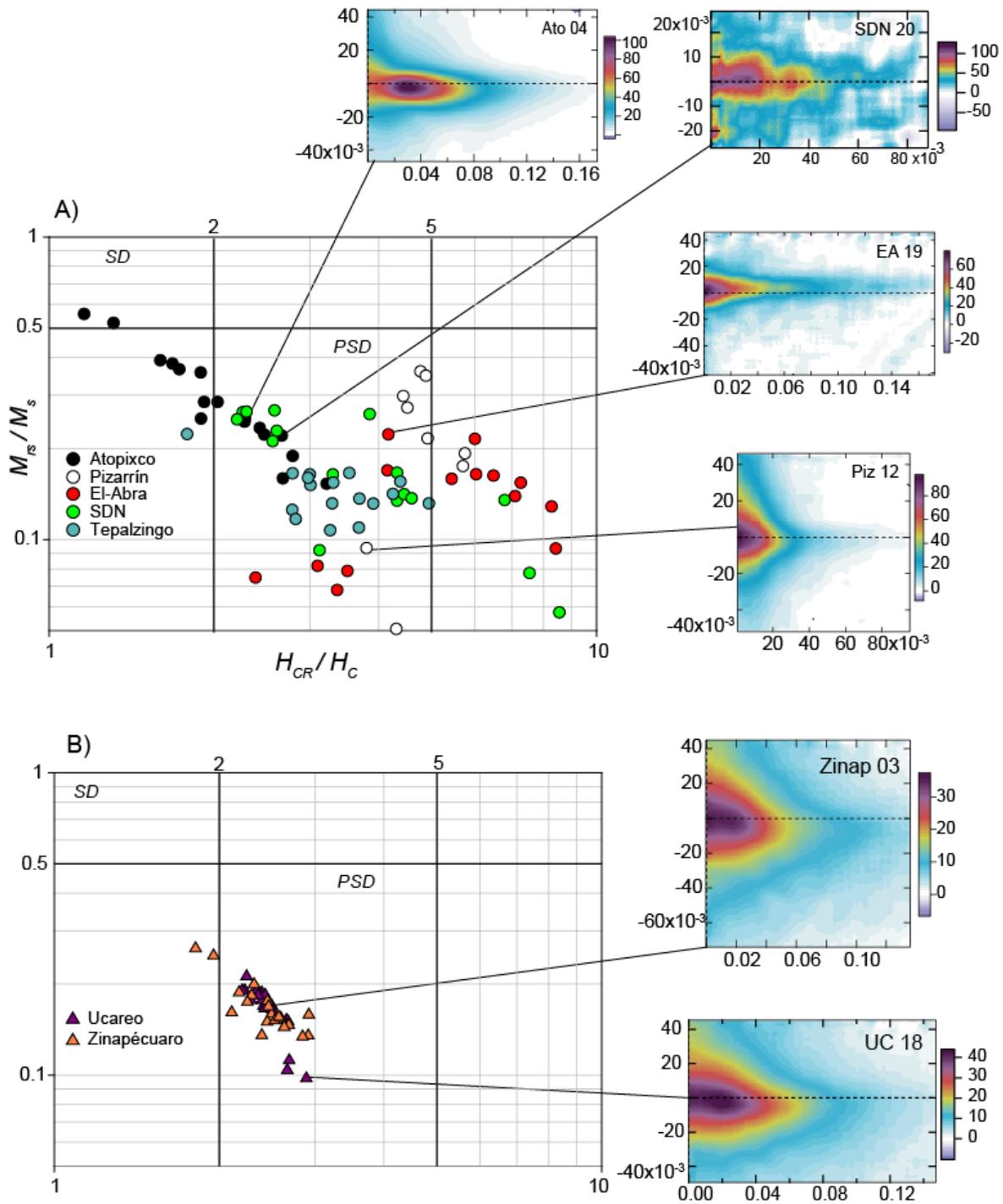


Figura 23. Diagramas de FORC asociados a su espécimen representado dentro de los diagramas de Day para los Estados de A) Hidalgo y B) Michoacán.

*Estado de México y Puebla*

En la figura 24 se presentan los diagramas para los yacimientos pertenecientes al Estado de México y Puebla. En el primer caso, los parámetros de histéresis de los tres yacimientos se sobreponen, a reserva del comportamiento SD-PSD que tiene IX 06, Mal 11 y Bue 15, que también presentan un comportamiento PDS según Day; contrastan en los estados de dominio según lo observado en los diagramas FORC pues Mal 11 presenta una configuración asociada a una predominancia de tamaños cercanos a una estabilidad SD.

Similarmente, para el caso de Puebla, tres de los cuatro yacimientos muestran traslape en términos de estado de dominio. Algunas muestras de Zaragoza se agrupan de manera diferenciada al resto y el diagrama FORC de Zaa 07 pertenece a este grupo, que sí relaciona el lugar del diagrama con el estado de dominio presente. En el comportamiento de TC 04 y Oyam 13 hay una disparidad de asociación según el diagnóstico de Day y los gráficos FORC, pues TC 04 presenta una configuración PSD y debido a los bajos valores de coercitividad se asocia un tamaño fino que empata con la curva K-T, al igual que Oyam 13, se asocia un contenido mineral muy fino. Caso aparte es el sitio de Ixtetal que presenta dos agrupamientos bien diferenciados con respecto a los otros dos sitios a partir de la teoría de Day.

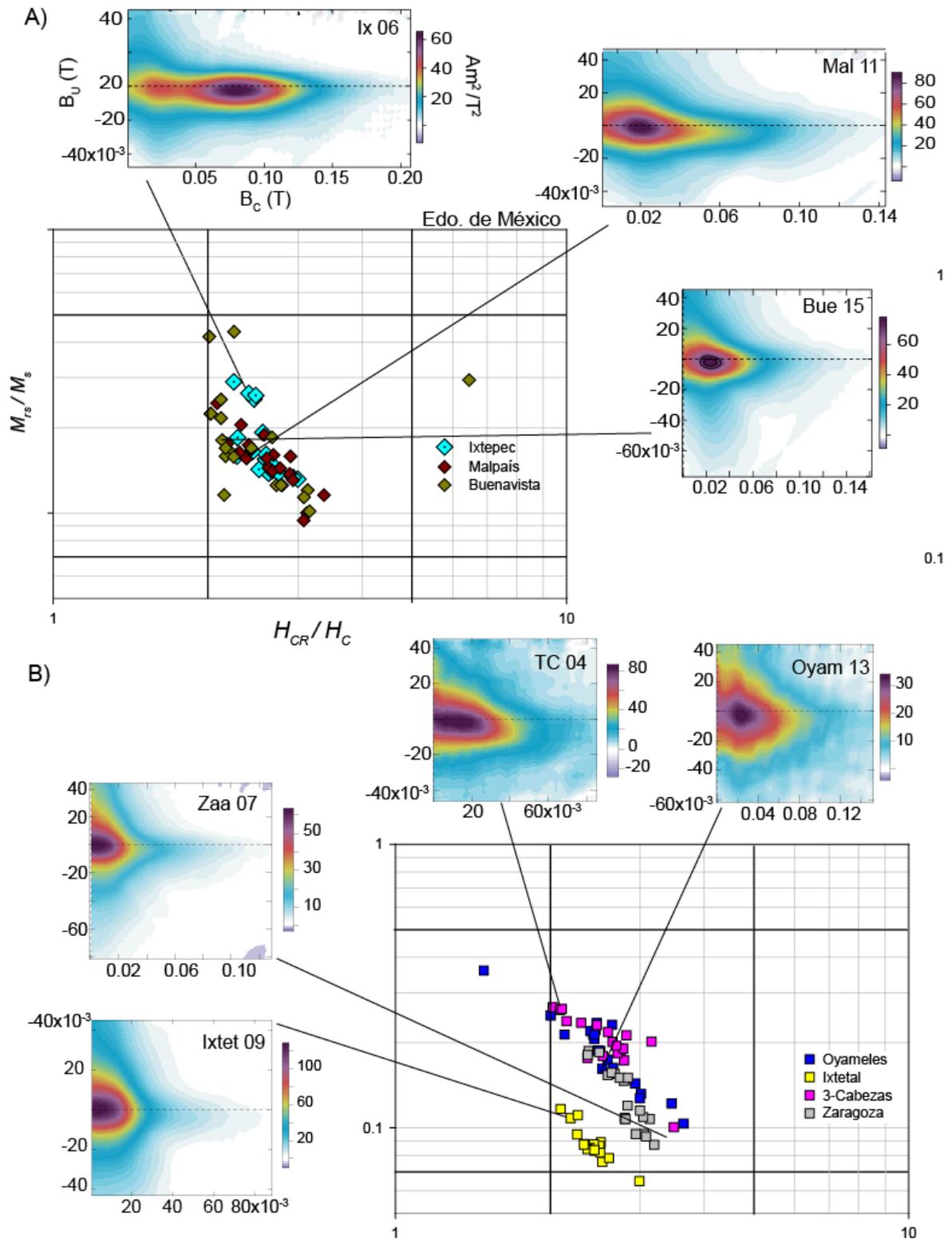


Figura 24. Diagramas de FORC asociados a su espacio representativo dentro de los diagramas de Day para los Estados de A) México y B) Puebla

### Diagramas de Néel

Los “Diagramas de Néel”, ilustran las tendencias de forma y tamaño de partículas ferrimagnéticas (Roberts *et al.*, 2019). En la gráfica 25 parte inferior, se presentan las tendencias de Ti-magnetita (titanomagnetita) pobre en Ti (flecha roja) y TM60 o titanomagnetita enriquecida en Ti (flecha verde) según (Wang y Van der Voo, 2004).

Adicionalmente, los límites que sugieren configuración axial propuestos por Tauxe *et al.* (2002), tienen el fin de establecer diferencias entre partículas DS uniaxiales a partir de la coercitividad. De forma general, muchos de los resultados obtenidos se encuentran dentro de la tendencia de minerales alargados (2:1), con excepción de Hidalgo que muestra una mezcla de formas entre casi cúbicas y alargadas (figura 25).

#### *Estado de México*

El diagrama Néel del Estado de México (figura 25) presenta las tendencias de los tres yacimientos que quedan dentro de la zona USD+SP. Sólo algunos especímenes pertenecientes a Malpaís y uno de Buenavista quedan fuera de la misma. Justo por encima del límite TM0 (titanomagnetita con bajo contenido de titanio), se aprecia una tendencia lineal para el sitio de Malpaís y Buenavista. El total de las muestras de Estado de México tienen una marcada tendencia a estar del lado derecho del triángulo, por lo que se deduce un contenido mayoritario de Titanomagnetita como mineral predominante según los valores asociados de Hc, y forma alargada. No es posible diferenciar entre distintos yacimientos.

#### *Puebla*

Este diagrama (Néel) presenta con mayor claridad los comportamientos diferenciados para el sitio Ixtetal y un grupo de Zaragoza (cuadros amarillos y grises respectivamente) expuestos en el diagrama de Day. Con excepción del grueso de las muestras que provienen de Oyameles, todas las demás están dentro de la zona USD+SP, que puede sugerir una predominancia de anisotropía uniaxial (Roberts *et al.*, 2019; Tauxe *et al.*, 2002).

De igual manera, los valores de coercitividad tienden hacia un contenido empobrecido de Ti, por lo que los yacimientos de Puebla se entremezclan cerca de la tendencia de TM0 (flecha roja en figura 3). Ixtetal, y el subgrupo de Zaragoza localizado en el área de valores menores de coercitividad se agrupan entre la tendencia de TM60 (flecha verde) y flecha roja sugiriendo una composición mineral más uniforme en el sentido de los tamaños de partícula magnética.

### *Michoacán*

Los resultados de los dos sitios analizados se mantienen fuera de la zona USD+SP del diagrama Néel. Ambos dentro del rango de 20-40mT y se aprecia una tendencia de proporción lineal en ambos sitios. Sin embargo, destaca el agrupamiento apreciable tanto en coercitividad como en magnetización (figura 24).

### *Hidalgo*

Se aprecian los sitios con la mayor variedad de composición y formas. Hay una tendencia lineal de aumento de anisotropía de las partículas para el sitio SDN. La tendencia marcada por los círculos verde claro se encuentran en medio de las flechas de contenido de Ti por lo que se aprecia una similitud en términos de la composición magnética. Incluso, hay algunos especímenes que sobresalen de la tendencia marcada por Wang y Van der Voo (2004). Algunas muestras de Tepalzingo mantienen una constante en los valores de coercitividad entre 20-40 mT, este comportamiento varía únicamente en función de su contenido de Ti. Los sitios de Atopixco, El Pizarrín y El Abra no muestran tendencias ni se agrupan dentro de los límites teóricos establecidos. A reserva de algunas muestras de Atopixco que muestran un empobrecimiento en Ti y un aumento de anisotropía aparente conforme el cociente de magnetización aumenta.

Destacan los altos valores de coercitividad mayores a 40 mT y rango amplio en las razones de magnetización de El Abra y El Pizarrín, lo que sugiere un posible contenido ultrafino de hematita o de alguna componente de oxidación asociada Wang y Van der Voo (2004) que dejan los demás especímenes fuera del gráfico.

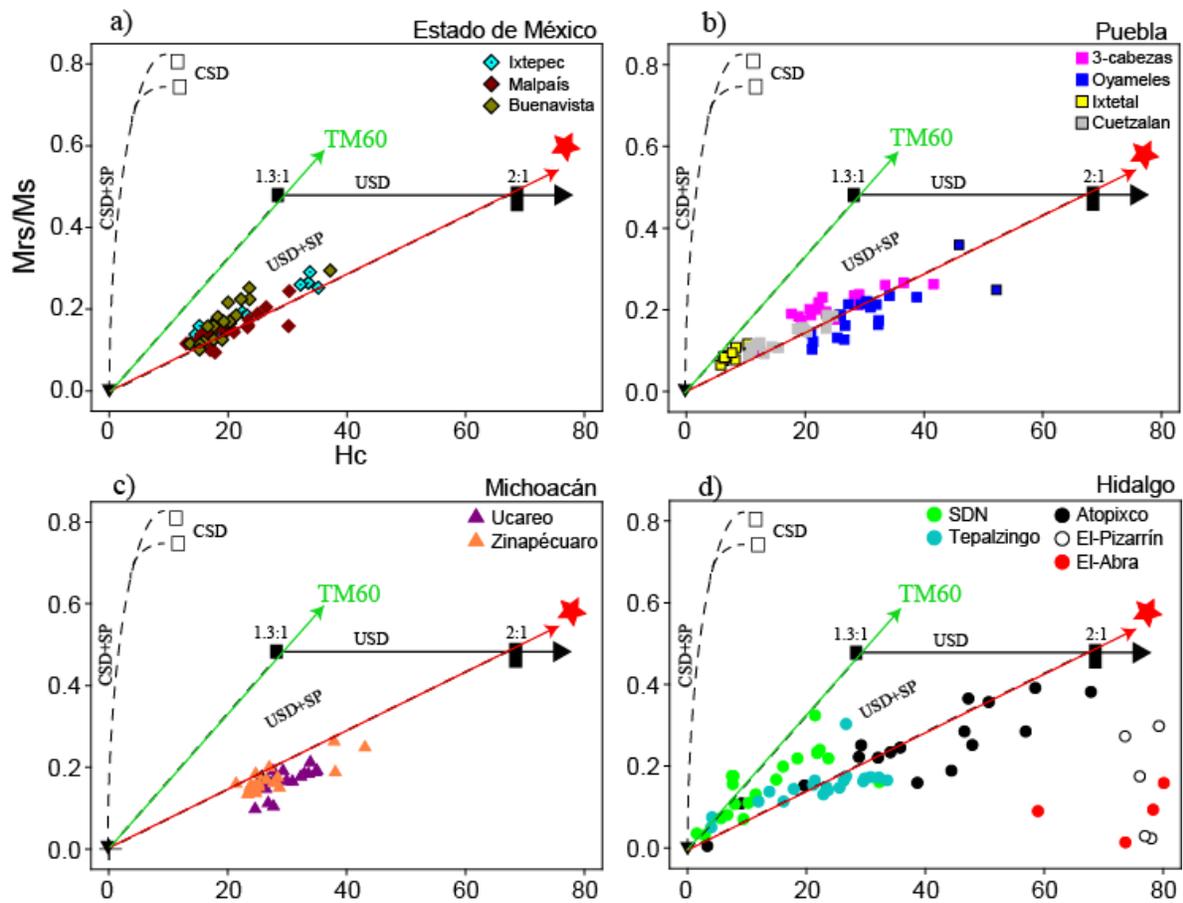


Figura 25. Diagrama de Néel que muestra resultados de sitios geológicos de obsidiana. a-d) Ilustran los diagramas ( $M_{rs}/M_s$  vs  $H_c$ ) de Néel (1955) modificados por Tauxe et al. (2002) para cada uno de los estados trabajados. Las flechas verdes y rojas marcan la tendencia para TM60 y titanomagnetita (TM) empobrecida en Ti según Wang y Van der Voo (2004). La estrella roja significa "TM bajo Ti".

## DISCUSIÓN

Los resultados de los experimentos descritos permitieron realizar una interpretación integral de la obsidiana en la región central de México. La información generada está estructurada en tres categorías o núcleos que engloban todos los resultados: (1) Factor de Koenigsberger, (2) Dependencia de las propiedades magnéticas vs. temperatura: curvas K-T y (3) Dependencia de las propiedades magnéticas vs campo magnético: curvas de histéresis, FORC y separación (Unmix).

### **Factor de Koenigsberger, Q.**

Como se mostró antes, la línea calculada para  $Q=1$  marca un parámetro que permite resaltar comportamientos distintos en los sitios trabajados. Tales comportamientos ocurren de manera inter- y/o intraflujo en cada sitio. En la mayoría de los casos, es a partir de la NRM donde estos comportamientos tienen su variación, en otros pocos, es a partir de la susceptibilidad magnética.

La mayor parte de los sitios presentan valores por debajo de  $Q=1$ . Este resultado, puede deberse a dos factores: uno de ellos es debido a una variación del contenido volumétrico de partículas magnéticas que han adquirido la NRM; el segundo debido a una predominancia de tamaños asociados a MD (Alva-Valdivia & Urrutia, 1999).

Un elemento importante que podría ser característica-tipo de materiales vítreos, como son las obsidianas es la baja magnitud de los valores asociados (NRM,  $k$  y  $Q$ ) a los gráficos trabajados como son los diagramas donde se presentan los factores  $Q$  (ver capítulo IV), las magnitudes de NRM son del orden de  $10^{-6}$  a  $10^1$  A/m y para el caso de la susceptibilidad magnética 1 a 2000 ( $10^{-6}$ ) SI. Dichos valores son similares a los reportados por Frahm y Feinberg (2013), Borradaile et al., 1998 y, en comparación a otras litologías reportadas, contrastan en al menos, dos órdenes de magnitud (e.g. Alva-Valdivia y Urrutia, 1999).

Esta “característica-tipo” se repite tanto en los diagramas FORC como en las curvas Unmix (para los valores en los ejes verticales de ambos casos); de manera similar en las curvas de histéresis así como en curvas de K-T. Un mejor desarrollo de esta idea se describe más adelante, para ser complementado con la interpretación de los resultados dependientes del campo magnético.

### **Dependencia de las propiedades magnéticas vs. temperatura: curvas K-T.**

A partir de los resultados se constató que hay un comportamiento distinto entre los yacimientos de obsidiana asociados por estado. Sin embargo, concluir que una sola curva experimental representa globalmente las fases magnéticas dentro de un yacimiento de obsidiana es incorrecto. Entonces, se propone que los sitios o yacimientos de obsidiana analizados parecen poseer una huella magnética con variación magnetomineralógica a nivel intraflujo, con excepción de los sitios de Michoacán, que poseen comportamientos y mineralogía bastante similares.

Los resultados experimentales muestran que los rangos más amplios de variación de la susceptibilidad pertenecen a los sitios de Hidalgo y, en segundo lugar, Estado de México, de manera específica, en los sitios de Tepalzingo e Ixtepec. Esto puede deberse a una mayor propensión de formación de fases magnéticas con volumen mayor en fases de TM con variado contenido de Ti, además de magnetita y/o compartiendo la ocurrencia con porciones aún más finas de maghemita o hematita.

En el caso de Puebla, con la excepción de un comportamiento atípico en TC 04 y una curva que no sugiere contenido importante de magnetita en Oyam 13. Las curvas K-T de Ixtetal y Zaragoza indican la posibilidad de realizar estudios magnéticos con objetivos más específicos (e.g., candidatos potenciales a estudios de paleointensidad) debido al alto grado de reversibilidad.

Adicionalmente a las curvas de los 14 sitios estudiados, se efectuó una primera aproximación de caracterización magnética en las muestras de mano de varios sitios en la Sierra de las Navajas (figura 14). Esto eventualmente será interpretado en conjunto con la descripción petrológica y geológica de los flujos asociados a obsidianas de López-Velarde (2020). A pesar de tener comportamientos que difieren entre sí, en general, las  $T_c$  calculadas sugieren predominancia de magnetita. La importancia de la Sierra de las Navajas como fuente de obsidiana en un contexto de estudios arqueológicos nos hace proponer, para un futuro cercano, un muestreo con fines exclusivamente magnéticos complementado con estudios interdisciplinarios (e.g. López-Velarde, 2020).

Las distintas curvas de calentamiento/enfriamiento en los experimentos de alta temperatura señalan la presencia de cambios de fases minerales. Algunos de estos cambios de fase se deben a procesos de oxidación (la curva de enfriamiento a alta temperatura está por debajo de la de calentamiento) y, menos frecuentemente, se deben a una somera neoformación mineral (la curva de enfriamiento a alta temperatura está por encima de la de calentamiento) (Henry, 2007). En consonancia con este comportamiento,

los diagramas FORC señalan la ocurrencia de estados de dominio transitorios entre vórtex con una tendencia a SD además de picos o crestas centrales con valores de coercitividad asociados a magnetitas o TM con Ti variable (Figuras 16-21). A reserva de alguna posible caracterización con diagramas FORC de obsidianas estudiando las posibles morfologías de minerales en vidrios volcánicos, se propone aquí que los diagramas FORC asociados a estados SV, en su mayoría, emparentan con la mineralogía reportada por las curvas K-T de especímenes con TM en diferentes contenidos. Asimismo, el rápido enfriamiento de este tipo de material ígneo y su alto contenido en SiO<sub>2</sub>, inhibe un proceso de nucleación magneto-mineralógico similar al de otro tipo de rocas, como es el caso de los filosilicatos que contribuyen en la formación de magnetita al calentarse, como ocurre por ejemplo en las rocas plutónicas (e.g., García-Amador et al., 2021). Además, debido al alto contenido de SiO<sub>2</sub> en magmas y ambientes geológicos requeridos para la génesis de obsidianas, la formación de óxidos de hierro-titanio en éstas es muy limitada. No obstante, uno de los mecanismos a través de los cuales se generan minerales magnéticos de manera predominante en las obsidianas puede ser la oxidación deutérica. Este proceso formativo de minerales magnéticos puede explicar la predominancia tanto de magnetita empobrecida en Ti, como de fases variables de titanomagnetita, cuyas T<sub>C</sub> varían en el rango de 250°C a 700°C (Henry, 2007) como minerales primarios dentro de la composición de estos vidrios. Por último, la variabilidad de comportamientos en términos de la concentración y la composición de las fases magneto-mineralógicas en estos sitios de obsidiana podrían explicarse de mejor manera si las T<sub>C</sub> presentes son vinculadas a distintos eventos térmicos, pues a pesar del marco limitante de formación, los ambientes geológicos dentro de los cuales las obsidianas están inmersos pueden sufrir eventos posteriores (e.g., eventos eruptivos subsecuentes, alteraciones hidrotermales, flujos de corrientes piroclásticas) que modifiquen o impliquen una transformación total en la mineralogía.

### **Dependencia de las propiedades magnéticas vs. campo magnético: curvas de histéresis, FORC y desmezcla.**

En general, a partir del análisis de estos resultados, se pudo corroborar la contribución dominante de magnetita en todos los sitios. En particular, de los diagramas FORC y curvas Unmix correspondientes, los valores de coercitividad reportados en trabajos previos para magnetitas son confirmados en este trabajo (Roberts *et al.*, 2000; Roberts *et al.*, 2006; Bilardello, 2020). Para el caso de Tepalzingo, el comportamiento atípico de la curva K-T y los parámetros de histéresis parecieran contrastar con sus diagramas FORC y curvas Unmixing, pues la contribución de una sola componente además de un estado de dominio

con efectos de activación térmica (figura 16) están acordes a valores altos de Hcr y bajos de Hc, muestra Tep 15 (tabla 2 y figuras 11 y 16). Sin embargo, la mineralogía asociada a esta muestra es típica de TM enriquecida en Ti (ver Dunlop, 2015). Los experimentos de histéresis, FORC y Unmix permiten hacer una inspección a fondo de los comportamientos de las obsidias, al permitir establecer contribuciones magnéticas mayoritarias junto a su vinculación con estados de dominio PDS y MD. Con relación a lo anterior, la construcción de los diagramas de Day y Néel permiten establecer diferencias, complementando la evaluación cualitativa y poniendo a prueba cada una de las herramientas teóricas para diagnosticar los estados de dominio magnético, así como la mineralogía no sólo en rocas volcánicas o sedimentos, sino claro también en obsidias.

En la figura 22, se pueden observar algunas tendencias lineales en el diagrama de Day (óvalos con pendiente negativa) de algunos sitios y la formación de subgrupos intra- e inter-flujo. Tales tendencias sugieren un patrón de comportamiento en los parámetros de histéresis que significan un aumento en los tamaños de grano. Por otro lado, tales tendencias no son claras en el caso del Diagrama de Néel, no obstante, este mismo gráfico aporta información que da paso a una perspectiva distinta para los grupos ensombrecidos en el diagrama de Day. A pesar de lo anterior, hay que tener en mente que tales resultados provienen de una respuesta volumétrica 'bulk' y no pueden ser considerados como elementos de caracterización de minerales únicos.

Los diagramas de Néel modificados con los límites de variación de Ti en función de la coercitividad propuesto por Wang y Van der Voo (2004) muestran un patrón constante en mineralogía magnética (i.e., magnetita y titanomagnetita predominantemente) pero con una variación de forma y tamaño de partícula magnética: por ejemplo Tres Cabezas, Ixtetal y Buenavista (desde cúbica hasta alargada).

Por otro lado, la construcción de las figuras 21 y 22 tienen como objetivo evaluar los alcances predictivos del gráfico de Day para el caso de vidrios volcánicos como son las obsidias. Lo anterior permite constatar un comportamiento no homogéneo de todos los sitios reportados en este manuscrito (comportamientos con transiciones SD-PSD; PSD-MD; MD que no necesariamente caen en los límites propuestos en el diagrama). Por esto, se concluye que utilizar de manera paralela el diagrama de Day junto con diagramas FORC permite diagnosticar de manera óptima los tipos de dominio magnético.

Aunado a lo anterior, es importante señalar que en la conceptualización de los flujos de obsidiana no debe ser considerado un comportamiento homogéneo puesto que no poseen un comportamiento uniforme en cuanto a conceptualización clásica de afloramiento

o sitio se refiere. En este sentido, se constatan no sólo comportamientos variables entre flujos, sino también dentro de flujos (inter e intra-flujo, respectivamente). Esto sugiere replantear los métodos y alcances de los estudios magnéticos con potencial para definir material vítreo bajo contexto arqueológico. Tales resultados conviven con lo reportado ya en un contexto global (Frahm & Feinberg, 2013; Frahm *et al.*, 2014). A reserva de una profundización analítica con herramientas como microscopías específicas como mineragrafía, SEM (Scanning Electron Microscopy), HRTEM (High-resolution TEM and STEM), espectroscopía Mössbauer y Raman, así como análisis de estadística multivariada y análisis de elementos traza, se propone que la baja magnitud de valores magnéticos en NRM y  $k$  se debe a la poca concentración de partículas magnéticas, de la mano con proporciones volumétricas mínimas de granos ultrafinos presentes en los materiales estudiados. Y, a su vez, ambas condiciones son dictadas por ambientes geológicos donde hay un enfriamiento casi instantáneo, proceso termodinámico único de las obsidias (Butler, 1998); Hinojosa-Prieto *et al.*, 2016).

La discriminación cualitativa de uno o varios posibles valores de coercitividad a partir del Unmixing de curvas IRM permite asociar minerales magnéticos que contribuyen en su mayoría a la respuesta magnética de las rocas. Si esto es complementado con el análisis de curvas K-T y diagramas FORC, la descripción magneto-mineralógica de una muestra puede optimizarse ampliamente.

Para el caso de las curvas de histéresis, las técnicas mencionadas arriba junto con la construcción de los diagramas de Néel y Day (evaluados de ser posible con FORC), se constata con una aproximación más vasta, el diagnóstico de estado de dominio en el que ocurren las fracciones magnetomineralógicas.

El conocimiento con el mayor detalle posible de la configuración de estados de dominio magnético permite identificar comportamientos magnéticos a nivel microscópico, pues el tipo de dominio magnético es de los principales factores que controlan las propiedades magnéticas y, por tanto, la capacidad de mantener un registro magnético (Dunlop y Özdemir, 2015).

Además, dilucidar la presencia o ausencia de interacciones magnetoestáticas presentes en las muestras puede ser un factor importante para identificar materiales óptimos a pilotajes de paleointensidades con alto grado de éxito (Roberts *et al.*, 2014), pues la ausencia de interacciones de este tipo se asocia a dominios SD y estos a su vez, se asocian a los tamaños de partícula que pueden registrar de mejor manera remanencias en tiempos geológicos (e.g. lx 06, Bue 15).

Por otro lado, es posible incluso establecer señales asociadas a estados de dominio PSD que posean una configuración más cercana a SD, como el caso de los estados vórtex (single vórtex o SV) que presentan picos centrales desplazados hacia el origen como señal característica dentro de los diagramas FORC (Bilardello, 2020).

Incluso, como se reporta en la sección de resultados, señales FORC que no están centradas sobre el eje horizontal sino desplazadas hacia abajo son características de procesos asociados, ya sea a formaciones de muros de dominio, o bien a nucleaciones (Roberts *et al.*, 2000).

Siguiendo con las ventajas del empleo de los diagramas FORC, estos permiten establecer morfologías o señales que son características de cada uno de los tipos de dominio propuestos en magnetismo de rocas. En este sentido, caracterizar con profundidad a partir de un nivel micromagnético puede ayudar a ensanchar la curva de conocimiento de comportamientos magnéticos en términos de mineralogía magnética (e.g., magnetitas SD o MD, TM ricas o empobrecidas en Ti en vidrios volcánicos) pues tales minerales permiten complementar reconstrucciones de ambientes geológicos e incluso reconocer procesos posteriores a la formación primigenia de las rocas (Butler, 1998; Roberts *et al.*, 2006; Lascau *et al.*, 2015).

### **Implicaciones sobre la presencia de magnetita, titanomagnetita y demás fases magneto-mineralógicas en obsidias**

Una vez establecida la presencia de minerales magnéticos como la magnetita; sus versiones oxidadas, con variación de Ti (maghemita y titanomagnetita) y hematita según los distintos comportamientos, es importante esclarecer brevemente las implicaciones que esto conlleva.

El proceso de reconocimiento de la mineralogía magnética se basa principalmente en el cotejo de valores experimentalmente recopilados y revisados. Estos datos provienen principalmente del comportamiento de materiales sintéticos o sedimentos (para el caso de curvas de histéresis y diagramas FORC, e.g., Roberts *et al.*, 2022; Lascau *et al.*, 2015; Alva-Valdivia *et al.*, 2019); un amplio espectro de rocas ígneas y sedimentarias (curvas K-T, e.g., Dunlop y Özdemir, 2015), así como sedimentos lacustres e incluso datos de origen orgánico (curvas Unmix como por ejemplo Roberts *et al.*, 2020; Egli, R., 2004a). Hoy en día, las diferentes fuentes de los datos recopilados se entrecruzan y las fronteras límite en las técnicas y materiales son cada vez más tenues con el fin de obtener la mayor cantidad de datos asociados con la mineralogía magnética y los materiales donde está contenida como por ejemplo Jackson y Bowles (2018), Li *et al.*, 2020, entre otros.

Establecidas las distintas propiedades magnéticas inherentes de cada una de las muestras arqueológicas, muestras *in situ* y las muestras geológicas y a partir del análisis de resultados para cada uno de ellos, no es posible establecer relación alguna entre las muestras de un contexto arqueológico (pilotos de Hidalgo) con los diferentes yacimientos de obsidiana.

Sin embargo, el aporte principal radica en la caracterización mineralógica de los yacimientos de obsidiana a partir de diferentes comportamientos de sus propiedades magnéticas. Hasta la fecha, el aporte de este tipo de datos derivados de material vítreo es escaso, por lo que cada una de las propiedades descritas representa una referencia para comparaciones posteriores. Por otro lado, aún es necesario establecer un método sistemático para caracterizar un afloramiento, yacimiento o flujo de obsidiana.

Con respecto a la idea anterior, el apoyo de herramientas de estadística multivariada es necesario para establecer relaciones fuente-fragmento que es de las intenciones que se han buscado desde hace décadas. Los alcances primordiales de este estudio se fundamentan principalmente en interpretaciones cualitativas para establecer una caracterización general. Complementar con interpretaciones estadísticas mientras se afina la metodología de estudio podrá permitir esclarecer las variaciones intra flujo que se reportan aquí, y posterior a esto, la complejidad aparente de estos comportamientos podría tener alguna explicación asociada a factores tanto arqueológicos, como geológicos.

## CONCLUSIONES

Es necesario establecer un muestreo con fines exclusivamente magnéticos. Esto permite establecer una metodología más rigurosa en sentido paleomagnético y/o de magnetismo de rocas para obtener una interpretación más robusta. En este sentido, la adición de un contexto geológico o volcánico a estos estudios futuros, puede mejorar el entendimiento de estos vidrios volcánicos desde una perspectiva multidisciplinaria. Por otro lado, la relación de estudios de caracterización magnética para las obsidias de México puede vincularse con investigaciones antropológicas y arqueológicas, por ejemplo, a través de estudios de paleointensidades. En este sentido, la Sierra de Las Navajas o la región de Otumba, Estado de México, poseen un amplio potencial como punto de intersección para un análisis en detalle y a mayor escala de propiedades magnéticas, geoquímicas, petrográficas, entre otras.

La construcción de los diagramas de Day y Néel permiten establecer diferencias que por separado no se perciben. En este sentido, complementar la evaluación cualitativa y poner a prueba cada una de las herramientas teóricas para diagnosticar los estados de dominio magnético, así como la mineralogía no sólo en rocas volcánicas o sedimentos sino también en obsidias, enriquecerá los análisis de los resultados y las interpretaciones de los mismos.

Las obsidias de este estudio poseen una remanencia mínima que está dominada por granos ultrafinos además de una concentración mínima. Al mismo tiempo, ambas condiciones son dictadas por ambientes geológicos donde hay un enfriamiento casi instantáneo, proceso termodinámico único de las obsidias.

La discriminación cualitativa de uno o varios posibles valores de coercitividad a partir del Unmixing de curvas IRM permite asociar minerales magnéticos que contribuyen en su mayoría a la respuesta magnética de las rocas. Si esto es complementado con el análisis de curvas K-T y diagramas FORC, la descripción magneto-mineralógica de una muestra puede optimizarse ampliamente.

Para el caso de las curvas de histéresis, además de adicionar las técnicas mencionadas arriba junto con la construcción de los diagramas de Néel y Day (evaluados de ser posible con FORC), se constata una aproximación más vasta, del diagnóstico de estado de dominio.

De manera sintetizada, se destaca lo siguiente:

- Este estudio abre una discusión que posee potencial para enriquecer a futuro el alcance del magnetismo de rocas aplicado en obsidianas.
- Los datos generados a partir de los experimentos K-T; diagramas FORC; Unmix y los diagramas de Néel así como los de Day referenciando diagramas específicos de FORC contribuyen a una primer caracterización micro-magnética a detalle en catorce sitios de yacimientos de obsidiana en la zona central de la faja volcánica mexicana.
- La caracterización de estados de dominio magnético es fundamental para establecer patrones de comportamiento a diferentes escalas dentro de un mismo cuerpo geológico.
- La baja magnitud de valores magnéticos en los resultados se vincula con la poca concentración de partículas magnéticas así como de proporciones volumétricas mínimas de granos ultrafinos presentes en los materiales estudiados.
- Caracterizar con profundidad a partir de un nivel micromagnético puede ayudar a ampliar el conocimiento de comportamientos magnéticos en términos de mineralogía magnética.
- La mineralogía magnética presente en estos flujos de obsidiana es magnetita (fase de mayor contribución), TM con variación en contenido de Ti además de concentraciones mínimas de maghemita y hematita.
- En las muestras estudiadas dominan estados de dominio PSD y MD.
- Es necesario realizar un muestreo con metodología paleomagnética y su posterior análisis por magnetismo de rocas macro- y micromagnético para determinar con alto grado de confiabilidad las posibles fuentes volcánicas de las obsidianas arqueológicas.

- Para una construcción tipológica de propiedades magnéticas en obsidianas, es importante tener en cuenta la no uniformidad en el comportamiento dentro de estos flujos.

## AGRADECIMIENTOS

Al proyecto PAPIIT-DGAPA-UNAM IN-101521. De igual manera al Dr. Guillermo Acosta y al Maestro Víctor García. También a la arqueóloga Silvia Dominguez y al Dr. Alejandro Pastrana.

## REFERENCIAS

Acosta Ochoa, G. (2015). Informe de la primera fase de excavaciones de Tepexpan y San Gregorio Atlapulco, Proyecto Agricultura Inicial Y sociedades Aldeanas, Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM

Acosta Ochoa, G., García, V., Montemayor, X.,González, I. y Palma, J. (2014). Excavaciones en San Gregorio Atlapulco. En Proyecto Poblamiento, Agricultura Inicial y Sociedades Aldeanas en la Cuenca de México. Informe de la temporada 2013: Excavaciones en Tepexpan, Edo.Mex. y San Gregorio Atlapulco,D.F. y Propuesta 2014: Excavaciones en Tepexpan, y Texcoco, Edo. Mex. y San Gregorio Atlapulco, D.F., editado por O. G. Acosta, M. P. Pérez y J. Arroyo, pp.253-212. Informe que se emiten para su evaluación al Consejo de Arqueología, Archivo Técnico del la Coordinación de Arqueología,INAH, México.

Alva-Valdivia, L. y Urrutia Fucugauchi, J. (febrero, 1998). Rock magnetic properties and ore microscopy of iron ore deposit of Las Truchas, Michoacán, México. *Journal of Applied Geophysics*, 38, 277-299.

Alva-Valdivia, L.M., Rodríguez-Trejo, A., Vidal-Solano, J.R., Paz-Moreno, F., Agarwal, A., 2019. Emplacement temperature resolution and age determination of Cerro Colorado tuff ring by TRM analysis, El Pinacate Volcanic Field, Sonora. Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 369, 145–154. Arneitz, P., Egli, R., Leonhardt, R., Fabian, K., 2

Bennett, Lawrence H., and Edward Della Torre. "Analysis of wasp-waist hysteresis loops." *Journal of applied physics* 97.10 (2005): 10E502.

Bilardello, D. (2019). Practical Magnetism I: Discriminating SD and MD magnetite particle behavior through FC-ZFC remanence curves. *The IRM Quarterly*, 29 (3), 1-14.

Bilardello, D. (2020). Practical Magnetism II: Humps and a bump, the maghemite song. *The IRM Quarterly*, 30 (1), 1-11.

Bilardello, D. & Egli, R. (2020). Practical Magnetism V: another FORC in the road? Understanding, measuring, interpreting FORC diagrams, part A. *The IRM Quarterly*, 30 (4), 1-20.

Bilardello, D. & Egli, R. (2020). Practical Magnetism VI: another FORC in the road? Understanding, measuring, interpreting FORC diagrams, part B. *The IRM Quarterly*, 31 (2), 1-17.

Borradaile, G.J., Stewart, J.D., Ross, W.A., 1998. Characterizing stone tools by rock-magnetic methods. *Geoarchaeology* 13, 73-91.

Bowles, J., Jackson, M., Chen, A. y Solheid, P. (2009). Interpretation of Low-Temperature Data Part I: Superparamagnetism and Paramagnetism. *The IRM Quarterly*, 19 (3), 1-16.

Bowles, J., Jackson, M. Banerjee, S. (2010). Interpretation of Low-Temperature Data Part II: The Hematite Morin Transition. *The IRM Quarterly*, 20 (1), 1-12

Bowles, J., Howie, R., Vaughan, D. y Zussman, J. (2011). *Rock-Forming Minerals, Volume 5A. Non-Silicates: Oxides, hydroxides and sulphides*. London: The Geological Society.

Butler, R. (1998). *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Electronic Edition. Department of Geosciences, University of Arizona, 238 p.

Church, T. y Caraveo, C. (1996). The magnetic susceptibility of Southwestern obsidian: an exploratory study. *North American Archaeologist*, 17, 271-285.

Cobean, R., Coe, M., Perry, E., Turekian, K. y Kharkar, D. (noviembre, 1971). Obsidian Trade at San Lorenzo Tenochtitlan, México. *Science*, 174 (4010), 666-671.

Cobean, R. (2002). *Un Mundo de Obsidiana: Minería y comercio de un vidrio volcánico en el México antiguo* (1a. Ed). México: Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) / University of Pittsburgh.

Charlton, T. y Spence, M. (1982). Obsidian exploitation and civilization in the Basin of México. Mining and Mining techniques in ancient Mesoamerica, editado por P. C. Ewigand y G. Gwynne. *State University of New York at Stony Brook, New York*, 6 (1-2), 7-77.

Day, R., Fuller, M., & Schmidt, V. A. (1977). Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and planetary interiors*, 13(4), 260-267.

Duttine, M., Scorzelli, R., Poupeau, G., Bustamante, A., Bellido, A., Lattini, R. y Guillaume-Gentil, N. (2007). Provenance study of obsidians from the archaeological site of La Maná (Ecuador) by electron spin resonance (ESR), SQUID magnetometry and 57 Fe Mössbauer spectroscopy. *Hyperfine Interactions*, 175, 85-90.

Dumas, R. K., Li, C. P., Roshchin, I. V., Schuller, I. K., & Liu, K. (2007a). Magnetic fingerprints of sub-100 nm Fe dots. *Physical Review B*, 75(13), 134405.

Dumas, R. K., Liu, K., Li, C. P., Roshchin, I. V., & Schuller, I. K. (2007b). Temperature induced single domain–vortex state transition in sub-100 nm Fe nanodots. *Applied Physics Letters*, 91(20), 202501.

Dunlop, D. (mayo, 1972). Magnetic mineralogy of unheated and heated red sediments by coercivity spectrum analysis. *Geophysical Journal International*, 27, 37-55.

Dunlop, D., Stacey, F. y Gillingham, D. (febrero, 1974). The origin of thermoremanent magnetization: contribution of pseudo-single-domain magnetic moments. *Earth and Planetary Science Letters*, 21, 288-294.

Dunlop, D. J., & Özdemir, Ö. (2000). Effect of grain size and domain state on thermal demagnetization tails. *Geophysical Research Letters*, 27(9), 1311-1314.

Dunlop, D.J. (2002). Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J. Geophys. Res.* **2002**, 107, 2056.

Dunlop, D. y Özdemir, O. (2007). Magnetizations in Rocks and Minerals. En M. Kono (ed.). *Geomagnetism. Treatise on Geophysics, Volume 5*. (pp. 277-336). New York: Elsevier.

Dunlop, D. (noviembre, 2014). High-temperature susceptibility of magnetite: a new pseudo-single-domain effect. *Geophysical Journal International*, 199, 707-716.

Dunlop, D. y Özdemir, Ö. (2015). Magnetizations in Rocks and Minerals. En M. Kono (ed.). *Geomagnetism. Treatise on Geophysics, Volume 5*. (pp. 277-336). New York: Elsevier.

Egli, R. (2003). *Environmental influences on the magnetic properties of lake sediments* (Doctoral dissertation, ETH Zurich).

Egli, R. (2004a). Characterization of Individual Rock Magnetic Components by Analysis of Remanence Curves, 1. Unmixing Natural Sediments. *Studia Geophysica et Geodaetica* 48, 391–446 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:SGEG.0000020839.45304.6d>

Egli, R. (2004b). Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves, 2. Fundamental properties of coercivity distributions. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29, 851-867.

Fabian, K. (2003). Some additional parameters to estimate domain state from isothermal magnetization measurements. *Earth Planet. Sci. Lett.* 213, 337–345. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00329-7

Feinberg, J., Scott, G., Renne, P. y Wenk, H. (june, 2005). Exsolved magnetite inclusions in silicates: Features determining their remanence behavior. *Geology*, 33 (6), 513-516.

Ferriz, H. (1985). Caltonac, a Prehispanic Obsidian-mining center in Eastern Mexico?: A preliminary report. *Journal of Field Archaeology*, 12 (3), 363-370.

Frahm, E. y Feinberg, J. (october, 2013). From flow to quarry: magnetic properties of obsidian and changing the scale of archaeological sourcing. *Journal of Archaeological Science*, 40, 3706-3721.

Frahm, E. y Feinberg, J. (february, 2013). Empires and resources: Central Anatolian obsidian at Urkesh (Tell Mozan, Syria) during the Akkadian period. *Journal of Archaeological Science*, 40, 1122-1135.

Frahm, E. y Feinberg, J. (april, 2013). Environment and collapse: Eastern Anatolian obsidians at Urkesh (Tell Mozan, Syria) and the third-millennium Mesopotamian urban crisis. *Journal of Archaeological Science*, 40, 1866-1878.

Frahm, E. y Feinberg, J. (october, 2013). From flow to quarry: magnetic properties of obsidian and changing the scale of archaeological sourcing. *Journal of Archaeological Science*, 40, 3706-3721.

Frahm, E., Feinberg, J., Schmidt-Magee, B., Wilkinson, K., Gasparyan, B., Yeritsyan, B.,... Adler, D. (july, 2014). Sourcing geochemically identical obsidian: Multiscalar magnetic variations in the Gutansar volcanic complex and implications for Palaeolithic research in Armenia. *Journal of Archaeological Science*, 47, 164-178.

Frahm, E., Feinberg, J., Monnier, G., Tostevin, G., Gasparyan, B. y Adler, D. (october, 2016). Lithic raw material units based on magnetic properties: A blind test with Armenian obsidian and application to the Middle Palaeolithic site of Lusakert Cave 1. *Journal of Archaeological Science*, 74, 102-123.

García, V. (2018). *Procedencia e intercambio de obsidiana en la Cuenca de México en el Holoceno Medio (6000-4000 A.N.E): el caso de San Gregorio Altapulco, Xochimilco* (Tesis de maestría inédita). Universidad Nacional Autónoma de México: México.

Gaxiola, M. y Nelson, F. (abril, 2005). Estrategias de abastecimiento de obsidiana en Huapalcalco durante el Epiclásico. *Arqueología*, (35), 68- 90.

Glascock, M., Braswell, G. y Cobean, R. (1998). A systematic approach to obsidian source characterization. En M. S. Shackley (ed.). *Archaeological obsidian studies: method and theory*. (pp. 15-65). New York: Springer.

Glascock, M. (february, 2002). Obsidian provenance research in the Americas. *Accounts of Chemical Research*, 35 (8), 611-617.

Glascock, M., Neff, H., Stryker, K. y Johnson, T. (may, 1994). Sourcing archaeological obsidian by an abbreviated NAA procedure. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 180, 29-35.

Harrison, R. y Feinberg, J. (may, 2008). FORCinel: An improved algorithm for calculating first-order reversal curve distributions using locally weighted regression smoothing. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9.

Harrison, R. J., Muraszko, J., Heslop, D., Lascu, I., Muxworthy, A. R., & Roberts, A. P. (2018). An improved algorithm for Unmixing first-order reversal curve diagrams using principal component analysis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(5), 1595-1610.

Healan, D.M., 1997. Pre-Hispanic quarrying in the Ucareo-Zinapécuaro obsidian source area. *Ancient Mesoamerica* 8, 77-100.

Hejda, P., & Zelinka, T. (1990). Generalized Preisach model of hysteresis—theory and experiment. *Czechoslovak journal of physics*, 40(1), 57-68.

Heslop, D. (2015). Numerical strategies for magnetic mineral Unmixing. *Earth-Science Reviews*, 150, 256-284.

Henry, B. (2007). Magnetic mineralogy, changes due to heating. 512-514. EN Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism. Editores: David Gubbins y Emilio Herrero-Bervera. Editorial: Springer, lugar: Holanda.

Hinojosa-Prieto, H.R., Vidal-Solano, J.R., Kibler, K.W., Hinojosa-García, H.J., 2016. Geology of the Selene perlite deposit in the northern Sierra Madre Occidental, northeastern Sonora, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 68, 129-163.

Hopkinson, J. (1889). XIV. Magnetic and other physical properties of iron at a high temperature. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.(A.)*, (180), 443-465.

Joron, J. L., Demant, A., y Darras, V., 1990. Détermination de l'origine d'obsidiennes archéologiques du Michoacan nord-occidental (Mexique), par la géochimie des éléments en traces. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Serie II* 311.

Jackson, M., & Bowles, J. (2018). Malleable Curie temperatures of natural titanomagnetites: Occurrences, modes, and mechanisms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 921–940. <https://doi.org/10.1002/2017JB015193>

Jiles, D. 2015. Introduction to Magnetism and Magnetic Minerals. Tercera edición. Nueva York: CRC Press.

Kruiver, P. P., Dekkers, M. J., & Heslop, D. (2001). Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation. *Earth and Planetary Science Letters*, 189(3-4), 269-276.

Lasclu, I., Harrison, R. J., Li, Y., Muraszko, J. R., Channell, J. E., Piotrowski, A. M., & Hodell, D. A. (2015). Magnetic Unmixing of first-order reversal curve diagrams using principal component analysis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(9), 2900-2915.

Li J., Liu Y., Liu S., Roberts A.P., Pan H., Xiao T. y Pan Y. (2020). Classification of a Complexly Mixed Magnetic Mineral Assemblage in Pacific Ocean Surface Sediment by Electron Microscopy and Supervised Magnetic Unmixing. *Front. Earth Sci.* 8:609058. doi: 10.3389/feart.2020.60905

Lopez-Velarde, G. (2020). *Geoarqueología de los yacimientos de obsidiana con explotación Pre-hispánica en la sierra de las navajas, Hidalgo, México: Origen e identidad petrológica*. (Tesis de maestría inédita). Universidad de Sonora: México.

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 (5), 441-452.

Maxbauer, D. P., Feinberg, J. M., & Fox, D. L. (2016). MAX Unmix: A web application for Unmixing magnetic coercivity distributions. *Computers & Geosciences*, 95, 140-145.

Moskowitz, B. M., Jackson, M. J., & Chandler, V. W. (2015). Geophysical Properties of the Near Surface Earth: Magnetic. In *Treatise on geophysics* (pp. 139-174). Elsevier.

Müller, E. F. (1957). El valle de Tulancingo. *Revista Mexicana de Estudios Antropológicos*, 14, 129-37.

Muxworthy, A, David, H., and Wyn Williams. (2004). "Influence of magnetostatic interactions on first-order-reversal-curve (FORC) diagrams: A micromagnetic approach." *Geophysical Journal International* 158.3: 888-897.

Muxworthy, A. R., King, J. G., & Heslop, D. (2005). Assessing the ability of first-order reversal curve (FORC) diagrams to unravel complex magnetic signals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B1).

Muxworthy, A. R., & Roberts, A. P. (2007). First-order reversal curve (FORC) diagrams. En: D. Gubbins y E. Herrera-Bervera (eds.). *Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism*, 1, 266-272. Heidelberg: Springer.

Néel, L. (1949). Théorie du trainage magnétique des ferromagnétiques en grains fin avec application aux terres cuites. *Annals Géophysics*, 5, 99–136.

Néel, L., (1954). Remarques sur la theorie des proprietes magnetiques des substances dures. *Appl.Sci. Res.,Sect.B* 4, 13–24.

Néel, L. (1955). Some theoretical aspects of rock magnetism. *Advances in Physics*, 4 (14), 191–243. <https://doi.org/10.1080/00018735500101204>

Nelson, F.W., y Healan, D.M. (1995). Obsidians from the Ucareo and Zinapecuaro areas, Michoacan, Mexico. *Geological Society of America ed., Boulder, CO, USA*.

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, 2020, <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>), consulta: 15 de junio de 2020.

O'Reilly, W., 1984. *Rock and mineral magnetism*. Primera edición. Londres: Blackie.

Özdemir, Özden, David J. Dunlop, and Bruce M. Moskowitz. "The effect of oxidation on the Verwey transition in magnetite." *Geophysical Research Letters* 20.16 (1993): 1671-1674.

Pastrana, A., & Domínguez, S. (2009). CAMBIOS EN LA ESTRATEGIA DE LA EXPLOTACIÓN DE LA OBSIDIANA DE PACHUCA: TEOTIHUACAN, TULA Y LA TRIPLE ALIANZA. *Ancient Mesoamerica*, 20(1), 129-148. doi:10.1017/S0956536109000133

Paterson, G. A., Zhao, X., Jackson, M., & Heslop, D. (2018). HystLab: New Software for Processing and Analyzing Hysteresis Data. *Geophysical Data Bases, Processing and Instrumentation* 423 (C-112), 115.

Pick, Thomas, and Lisa Tauxe. "Characteristics of magnetite in submarine basaltic glass." *geophysical journal international* 119.1 (1994): 116-128.

Pike, C., Fernandez, A., 1999. An investigation of magnetic reversal in submicron-scale Co dots using first order reversal curve diagrams. *Journal of Applied Physical* 85, 6668–6676.

Pires-Ferreira, J. W., 1975. Formative Mesoamerican exchange networks with special reference to the Valley of Oaxaca (No. 7). U of M Museum Anthro Archaeology.

Preisach, F., 1935. Über die magnetische Nachwirkung. *Z. Phys.* 94, 277–302.

Roberts, A. P. (1995a). Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>). *Earth and Planetary Science Letters*, 134(3-4), 227-236.

Roberts, A. P., Cui, Y., & Verosub, K. L. (1995b). Wasp-waisted hysteresis loops: Mineral magnetic characteristics and discrimination of components in mixed magnetic systems. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B9), 17909-17924.

Roberts, A. P., Pike, C. R., & Verosub, K. L. (2000). First-order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B12), 28461-28475.

Roberts, A. P., Liu, Q., Rowan, C. J., Chang, L., Carvallo, C., Torrent, J., & Horng, C. (2006). Characterization of hematite, goethite, greigite, and pyrrhotite using first-order reversal curve diagrams. *J. Geophys. Res.*, 111, B12S35.

Roberts, A. P., Chang, L., Rowan, C. J., Horng, C. S., & Florindo, F. (2011). Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>): An update. *Reviews of Geophysics*, 49(1).

Roberts, A. P., Heslop, D., Zhao, X., & Pike, C. R. (2014). Understanding fine magnetic particle systems through use of first-order reversal curve diagrams. *Reviews of Geophysics*, 52(4), 557-602.

Roberts, A. P., Almeida, T. P., Church, N. S., Harrison, R. J., Heslop, D., Li, Y., Zhao, X. (2017). Resolving the origin of pseudo-single domain magnetic behavior. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(12), 9534-9558.

Roberts, A. P., Hu, P., Harrison, R. J., Heslop, D., Muxworthy, A. R., Oda, H., ... & Zhao, X. (2019). Domain state diagnosis in rock magnetism: Evaluation of potential alternatives to the Day diagram. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(6), 5286-5314.

Roberts, A.P., Zhao, X., Heslop, D., Abrajevitch, A., Chen, Y-H., Hu, P., Zhaoxia, J., Qingsong, L., Pillans, B.J. (2020). Hematite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) quantification in sedimentary magnetism: limitations of existing proxies and ways forward. *Geoscience Letters*, 7, 8. <https://doi.org/10.1186/s40562-020-00157-5>.

Roberts, A. P., Heslop, D., Zhao, X., Oda, H., Egli, R., Harrison, R. J., ... & Sato, T. (2022). Unlocking information about fine magnetic particle assemblages from first-order reversal curve diagrams: Recent advances. *Earth-Science Reviews*, 227, 103950.

Robertson, D. J., and D. E. France. "Discrimination of remanence-carrying minerals in mixtures, using isothermal remanent magnetisation acquisition curves." *Physics of the Earth and Planetary interiors* 82.3-4 (1994): 223-234.

Rivera González, I. (2019). *Los grupos precerámicos de las playas lacustres de la Cuenca de México: ocupación y transformación del entorno durante el Holoceno medio*. (Tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México: México.

Soto de Arechavaleta, M.D.L.D., 1990. Áreas de actividad en un taller de manufactura de implementos de piedra tallada. Nuevos enfoques en el estudio de la lítica, 215-242.

Stacey, F. D. (1961). Theory of the magnetic properties of igneous rocks in alternating fields. *Philosophical Magazine*, 6(70), 1241–1260. <https://doi.org/10.1080/14786436108243374>

Stacey, F. D. (1962). A generalized theory of thermoremanence, covering the transition from single domain to multi-domain magnetic grains. *Philosophical Magazine*, 7(83), 1887–1900. <https://doi.org/10.1080/14786436208213853>

Stacey, F.D. (1967). The Koenigsberger ratio and the nature of thermoremanence in igneous rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, v.2, p. 67–68.

Tauxe, L., T. A. T. Mullender, and T. Pick. "Potbellies, wasp-waists, and superparamagnetism in magnetic hysteresis." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 101.B1 (1996): 571-583.

Tauxe, Lisa. (1998). *Paleomagnetic principles and practice*. Editorial: Springer.

Tauxe, L., Bertram, H. N., & Seberino, C. (2002). Physical interpretation of hysteresis loops: Micromagnetic modeling of fine particle magnetite. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(10), 1-22.

Tauxe, L., Shaar, R., Jonestrask, L., Swanson-Hysell, N. L., Minnett, R., Koppers, A. A. P., & Fairchild, L. (2016). PmagPy: Software package for paleomagnetic data analysis and a bridge to the Magnetism Information Consortium (MagIC) Database. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(6), 2450-2463.

Tauxe, L., Butler, R.F., van der Voo, R. & Banerjee, S.K. (2010). *Essentials of Paleomagnetism*, University of California Press, Berkeley, CA., 512 pp.

Tauxe, L., Shaar, R., Jonestrask, L., Swanson-Hysell, N. L., Minnett, R., Koppers, A. A. P., & Fairchild, L. (2016). PmagPy: Software package for paleomagnetic data analysis and a bridge to the Magnetism Information Consortium (MagIC) Database. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(6), 2450-2463.

Thacker, P.T., Ellwood, B.B., 2002. The magnetic susceptibility of cherts: archaeological and geochemical implications of source variation. *Geoarchaeology* 17, 465-482

Urrutia, J. (1999). Preliminary results of a rock-magnetic study of obsidians from central México. *Geofísica Internacional*, 38, (2), 83-94.

Urrutia, J. y Pérez, L. (2017). Coercivity and Vector Magnetization Analysis of Obsidian Samples from the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Arqueología Iberoamericana*, 35, 23-28.

Vásquez, C.A., Nami, H.G., Rapalini, A.E., (2001). Magnetic sourcing of obsidians in southern South America: some successes and doubts. *Journal of Archaeological Science* 28, 613-618.

Vidal-Solano, J. R., Gómez-Valencia, A. M., Hinojo-Hinojo, A., & Lozano-Santa Cruz, R. (2020). Geochemistry and geological control of Sonora obsidian: new insights into the provenance study of archaeological obsidians in Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102840.

Volk, M. & Bilardello, D. (2017). Magnetic tests and characterization protocols: mineralogy and grain size / domain state Part I: isothermal strong field tests. *The IRM Quarterly*, 27 (4), 1-19.

Wang, D., & Van der Voo, R. (2004). The hysteresis properties of multidomain magnetite and titanomagnetite/titanomaghemite in mid-ocean ridge basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1-2), 175-184.

Weaver, I., Sternberg, R., Tykot, R.H., 2009. Magnetic Fingerprinting of Central Mediterranean Obsidian Source Groups. American Geophysical Union Joint Assembly, Toronto. Mayo 24-27.

Williams-Thorpe, O., 1995. Obsidian in the Mediterranean and the Near East: a provenancing success story. *Archaeometry* 37, 217-248.

Zanella, E., Ferrara, E., Bagnasco, L., Ollà, A., Lanza, R. y Beatrice, C. (2012). Magnetite grain-size analysis and sourcing of Mediterranean obsidians. *Journal of Archaeological Science*, 39, 1493-1498.

Zhao, X., Roberts, A. P., Heslop, D., Paterson, G. A., Li, Y., & Li, J. (2017). Magnetic domain state diagnosis using hysteresis reversal curves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122 (7), 4767-4789.

## MATERIAL SUPLEMENTARIO

Tabla 3. Datos generales sobre los yacimientos de obsidiana estudiados en este estudio.

<i>Localidad muestreada</i>	<i>Yacimiento, sistema</i>	<i>Estado</i>	<i>Y</i>	<i>X</i>	<i>Edad (Cobean, 2002)</i>
<i>El Pizarrín</i>	<i>El pizarrín, Tulancingo</i>	<i>Hidalgo</i>	<i>20.107.945</i>	<i>-98.348.812</i>	<i>Cenozoico Medio</i>
<i>El Abra</i>	<i>El Pizarrín, Tulancingo</i>	<i>Hidalgo</i>	<i>20.104.627</i>	<i>-98.323.283</i>	<i>Cenozoico Medio</i>
<i>Tepalzingo</i>	<i>Tepalcingo, Tulancingo</i>	<i>Hidalgo</i>	<i>20.135.809</i>	<i>-98.281.093</i>	<i>Cenozoico Medio</i>
<i>Malpaís</i>	<i>Malpaís, Otumba</i>	<i>Estado de México</i>	<i>19.066.037</i>	<i>-98.597.124</i>	<i>Cenozoico Medio</i>
<i>Buenavista</i>	<i>Soltepec, Otumba</i>	<i>Estado de México</i>	<i>19.677.378</i>	<i>-98.675.673</i>	<i>Cenozoico Medio</i>
<i>Ixtepec</i>	<i>C. Ixtepec, Otumba</i>	<i>Estado de México</i>	<i>19.703.347</i>	<i>-98.632.438</i>	<i>Cenozoico Medio</i>
<i>SDN</i>	<i>Sierra de las Navajas</i>	<i>Hidalgo</i>	<i>20.080.036</i>	<i>-98.573.795</i>	<i>Cenozoico Medio</i>
<i>Atopixco</i>	<i>Zacualtipan</i>	<i>Hidalgo</i>	<i>20.595.626</i>	<i>-98.618.902</i>	<i>Cenozoico Medio</i>
<i>Ixtetal</i>	<i>Ixtetal, Pico de Orizaba</i>	<i>Pie de carretera</i>	<i>19.106.831</i>	<i>-97.260.084</i>	<i>Cenozoico Medio</i>
<i>Oyameles</i>	<i>Zaragoza- Oyameles</i>	<i>Puebla</i>	<i>19.702.872</i>	<i>-97.53357</i>	<i>Cenozoico Superior</i>
<i>Zaragoza</i>	<i>Zaragoza- Oyameles</i>	<i>Puebla</i>	<i>19.894.773</i>	<i>-100.697.898</i>	<i>Cenozoico</i>
<i>Tres Cabezas</i>	<i>Paredón</i>	<i>Puebla</i>	<i>19.884.524</i>	<i>-98.275.197</i>	<i>Cenozoico Medio</i>

<i>Ucareo</i>	<i>Ucareo- Zinapécuaro</i>	<i>Michoacán</i>	<i>19.894.773</i>	<i>-100.697.898</i>	<i>Cenozoico Superior</i>
<i>Zinapécuaro</i>	<i>Ucareo- Zinapécuaro</i>	<i>Michoacán</i>	<i>19.853.119</i>	<i>-100.819.548</i>	<i>Cenozoico Superior</i>

*Tabla 4. Valores de NRM, K Y CAMPO TOTAL (H) de especímenes representativos para los catorce sitios de obsidiana trabajados.*

<i>Muestra</i>	<i>Susceptibilidad Magnética</i>	<i>NRM (A/m)</i>	<i>Sitio</i>	<i>Campo total (H)</i>
<i>SDN 20</i>	<i>164</i>	<i>2,86E-03</i>	<i>SDN</i>	<i>32,2</i>
<i>EA 19</i>	<i>338</i>	<i>9,87E-03</i>	<i>El Abra</i>	<i>32,23</i>
<i>Piz 12</i>	<i>330</i>	<i>2,74E-03</i>	<i>El Pizarrín</i>	<i>32,23</i>
<i>Tep 15</i>	<i>998</i>	<i>5,88E-03</i>	<i>Tepalzingo</i>	<i>32,24</i>
<i>Ato 04</i>	<i>1781</i>	<i>2,22E-03</i>	<i>Atopixco</i>	<i>32,46</i>
<i>Oyam 13</i>	<i>936</i>	<i>2,90E-03</i>	<i>Oyameles</i>	<i>32,05</i>
<i>TC 04</i>	<i>45</i>	<i>1,59E-03</i>	<i>Tres-Cabezas</i>	<i>32,12</i>
<i>Ixtet 09</i>	<i>1999</i>	<i>1,20E-03</i>	<i>Ixtetal</i>	<i>32,03</i>
<i>Zaa 07</i>	<i>1747</i>	<i>2,42E-03</i>	<i>Zaragoza</i>	<i>31,74</i>
<i>Mal 11</i>	<i>788</i>	<i>2,05E-03</i>	<i>Malpaís</i>	<i>31,99</i>
<i>Bue 15</i>	<i>986</i>	<i>6,46E+00</i>	<i>Buenavista</i>	<i>32</i>
<i>Ix 06</i>	<i>1305</i>	<i>3,46E+00</i>	<i>Ixtepec</i>	<i>32,02</i>
<i>Uc 18</i>	<i>627</i>	<i>1,46E-03</i>	<i>Ucareo</i>	<i>32,12</i>
<i>Zinap 03</i>	<i>1217</i>	<i>6,61E-03</i>	<i>Zinapécuaro</i>	<i>32,01</i>