

---

## **TÓPICO III: CIENCIAS DE LA TIERRA**

---

## CARACTERIZACION PRELIMINAR DE UN SUELO DE LA CUENCA DEL RIO DE LAS AVENIDAS, PACHUCA HIDALGO, MEXICO

E. Moreno Pérez<sup>a</sup>, J. Hernández Ávila<sup>a</sup>, E. Cerecedo Sáenz<sup>a</sup>, E. Salinas Rodríguez<sup>a</sup>, A. Arenas Flores<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
herjuan@uaeh.edu.mx

### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar de forma preliminar por medio de difracción de rayos X, y MEB-EDS un suelo (feozem háplico) de la cuenca del Rio de la Avenidas al sur de la ciudad de Pachuca. El sitio de muestreo se eligió mediante el análisis de ortofotos, y apoyándose con diversos recorridos por el área, se obtuvo una muestra representativa de una pared de corte en una obra de infraestructura de acuerdo a la normatividad de la SCT. La muestra previo cuarteo y preparación se analizó por medio de DRX, determinándose que la mineralogía de este suelo está dominada por cuarzo (01-082-0511), y en mediana y menor proporción cuarzo  $\alpha$  de alta presión (01-079-1914) y caolinita (00-003-0059), así como una pequeña proporción de albita (99-100-0713), es importante señalar que el cuarzo  $\alpha$  posee una alta densidad con respecto al cuarzo dominante. En tanto, por medio de MEB se observó la típica macla de albita en algunas muestras, así mismo, los análisis por medio de EDS mostraron la afinidad félscica de la muestra. De acuerdo a lo anterior y considerando la importancia del clima y del material parental como factores en la formación del suelo, se tiene que para la precipitación pluvial anual de la ciudad de Pachuca y con la herencia de la formaciones geológicas que suministraron el material (rocas félscicas predominantemente), la caolinita es el mineral de arcilla presente en este suelo.

**Palabras Clave:** Cuarzo, caolinita, alteración, rocas félscicas, suelos.

### ABSTRACT

This work aims to characterize preliminarily by XRD, SEM-EDS a soil (feozem haplic) of the river basin of Rio de las Avenidas in south of the city of Pachuca. The sampling site was selected based on previous studies by analyzing orthophotos, and various tours of the area, a representative sample was obtained of a wall cutting into an infrastructure work in accordance with the regulations of the SCT. The sample quartering and preparation was analyzed by XRD, it determined that this soil mineralogy is dominated by quartz (01-082-0511), and middle and lower proportion of high-pressure quartz  $\alpha$  (01-079-1914) and kaolinite (00-003-0059) and a small proportion of albite (99-100-0713), it is important to note that  $\alpha$  quartz has a high density with respect to the dominant quartz. Meanwhile, by SEM typical albite twinning was observed in some samples, also, the analysis by EDS showed the

felsic affinity of the sample. According with the last and considering the importance of climate and parent material as factors in soil formation, it has for the annual rainfall in the city of Pachuca and the geological formations that provided the material (rocks predominantly felsic), kaolinite clay mineral is present in the soil.

**Keywords:** Quartz, kaolinite, alteration, felsic rocks, soils.

## 1. INTRODUCCIÓN

El volumen de tierra (suelo) que en la actualidad se mueve en las obras de infraestructura ha crecido de modo incommensurable, y tanto desde el punto de vista económico, como del medio ambiental, es ineludible tener que utilizar los materiales disponibles en el entorno próximo, comenzando por los provenientes de las excavaciones propias de la obra. Si antes se descartaban gran cantidad de suelos por no cumplir unos criterios bastante rigurosos (caso de las arcillas), hoy es estrictamente necesario su empleo, siempre y cuando se demuestre mediante estudios y pruebas de laboratorio que cumplen con las especificaciones requeridas, tan es así que la Secretaría de Desarrollo Social SEDESOL en el oficio circular UPRI.613/1078/2014, de fecha 27 de Octubre de 2014, menciona que entre los materiales empleados para llevar a cabo el revestimiento de excavaciones de obras de infraestructura social, podrán considerarse el concreto hidráulico, asfalto, adoquín, piedra, arena, o bien aquellos que se consideren adecuados para garantizar la durabilidad de la obra revestida.

De acuerdo a este documento, queda abierta la posibilidad del uso de suelos estabilizados siempre y cuando se garantice la durabilidad de la obra. En ese sentido, el propósito de este trabajo es caracterizar de manera preliminar un suelo (feozem háplico) de la cuenca del Río de las Avenidas, Pachuca Hidalgo, que de acuerdo a los datos edafológicos del INEGI (Instituto de Estadística Geografía e Informática), se considera arcilloso por tener una textura media con un contenido de arcilla entre 18 y 35%, lo anterior con la finalidad de conocer su mineralogía y composición química para determinar, si este suelo es susceptible de ser tratado con estabilizadores base calcio, para cumplir con las especificaciones de la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes).

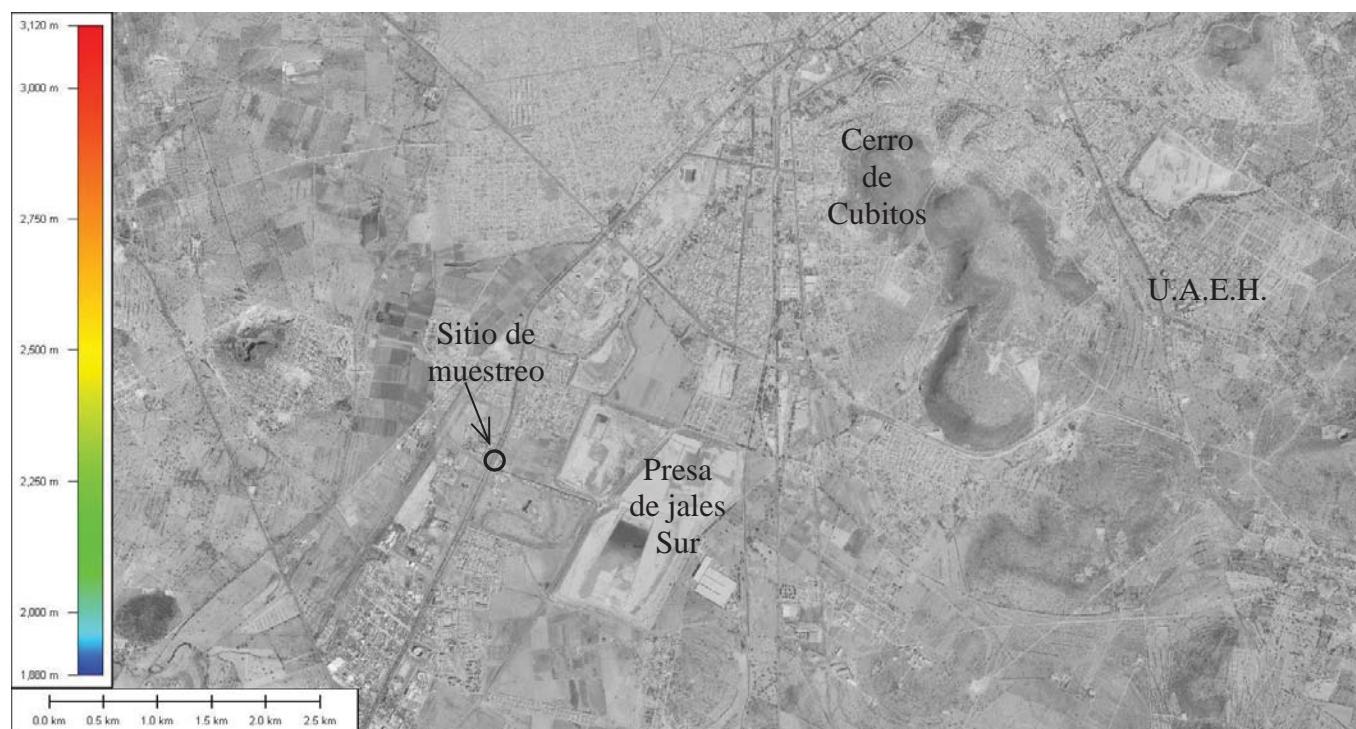
## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La selección del sitio de muestreo del suelo feozem háplico se realizó a partir de un estudio de fotointerpretación, recorridos de campo y conocimientos obtenidos de otras fuentes. Se utilizó software libre para sistemas de información geográfica con datos geográficos del INEGI (modelo digital de elevación F14d81, y ortofotos), también se utilizó la carta edafológica Pachuca F14d81 y la carta geológico-minera Pachuca, escala 1:50000.

Considerando la facilidad para muestrear el perfil de suelo, se aprovechó la excavación de una obra de infraestructura, ubicada a un costado del dren pluvial sur de la ciudad de Pachuca, a unos 500 metros de la presa de jales sur (figura 1). Para tal fin se usaron los métodos M-MMP-1-01/03, Muestreo de materiales para terracerías y M-MMP-1-03/03, Secado, disgrgado y cuarteo de muestras, de la sección suelos y materiales para terracerías, del Libro Métodos de Muestreo y Prueba de la Normatividad para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Para obtener la muestra de suelo, se hizo un canal vertical de sección transversal

uniforme en la pared de la excavación antes mencionada en toda su altura (figura 2), cuidando de no incluir la capa de tierra vegetal, el material extraído del canal (20 kg) se recogió en una lona ahulada, y se envasó en un recipiente hermético para su posterior cuarteo y preparación. Es importante mencionar que en el fondo de la excavación aflora material poroso, débilmente endurecido (figura 2), que podría pertenecer a la toba Cubitos (QphoPu) que data del pleistoceno-holoceno, de acuerdo a la información de la carta geológica minera Pachuca F14-D81, estos materiales se catalogan como un depósito pumicítico poroso.

La muestras del suelo feozem háplico previamente cuarteadas y preparadas, se analizaron por difracción de rayos X en un aparato marca INEL Equinox 2000 con radiación CoK $\alpha$ 1, y por MEB-EDS Microscopía Electrónica de Barrido – Microanálisis elemental por EDS en un equipo marca Jeol modelo JSM-6300.



**Figura 1.** Sitio de muestreo del suelo feozem háplico al sur de la ciudad de Pachuca.



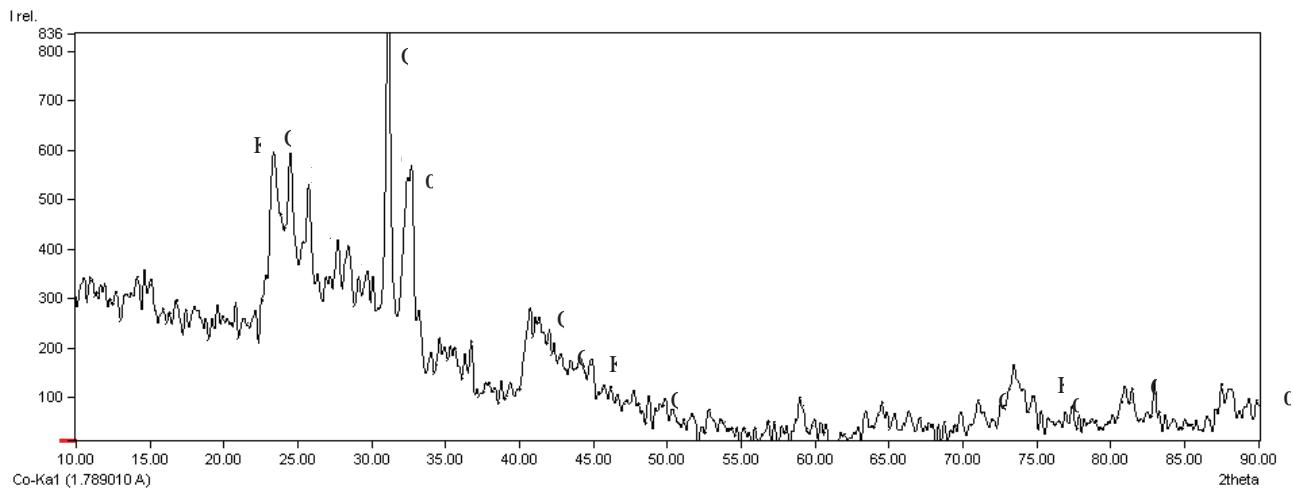
**Figura 2.** Canal de muestreo en la pared de la excavación (izquierda) y detalle del depósito poroso en el fondo de la misma (foto derecha).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### ANÁLISIS MINERALÓGICO

Mediante la técnica de difracción de rayos X, se determinó de manera preliminar que la mineralogía de este suelo (feozem háplico) está dominada por cuarzo (01-082-0511), en mediana y menor proporción cuarzo  $\alpha$  de alta presión (01-079-1914) y caolinita (00-003-0059), así como una pequeña proporción de albita (99-100-0713), (figura 3). Es importante señalar que el cuarzo  $\alpha$  identificado, posee una alta densidad con respecto al cuarzo dominante, la identificación de esta fase polimorfa es preliminar, ya que puede existir un error debido al traslape de picos, además que esta especie ocurre solo a presión elevada. Existen otros picos que aún no han sido identificados, y una cantidad de material amorfo que se determinará mediante otras técnicas.

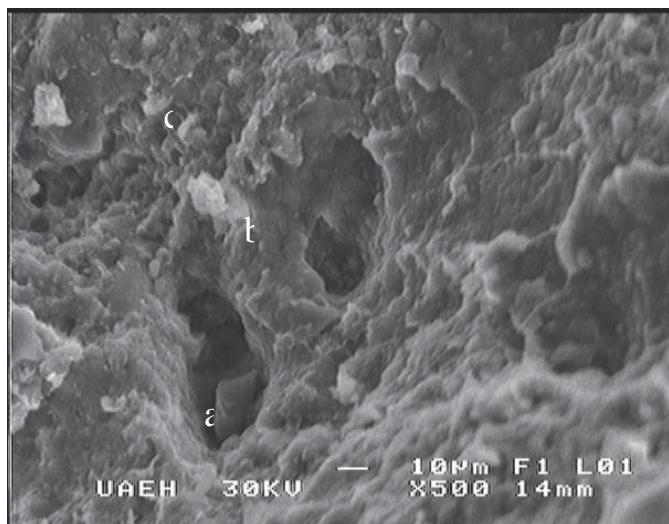
La presencia mayoritaria de cuarzo se debe al contenido variable de esta especie en las rocas ácidas e intermedias que circundan la llanura del valle Pachuca-Tizayuca, y que fisiográficamente pertenecen a la sierra volcánica compleja de Pachuca (rocas riolíticas y andesíticas). Por otro lado, se presume que la caolinita y la albita pueden provenir de la mineralogía de alteración detectada en los distritos mineros de esta región [1], o bien para el caso particular del mineral de arcilla (caolinita), se tiene que, el intemperismo de las tobas volcánicas localmente denominadas como tepetates, produce grandes cantidades de esmectitas, si el ambiente es seco, o bien caolinitas y metahaloisita si es húmedo [2], este último, es el caso del suelo feozem háplico analizado.



**Figura 3.** Difractograma de la muestra de suelo de la cuenca del Río de las Avenidas al sur de Pachuca (Q = Cuarzo, K = Caolinita,  $\alpha$  = Cuarzo alfa, A = Albita).

## ANÁLISIS MORFOLÓGICO

Se analizaron varios terrones seleccionados al azar de la muestra del suelo en cuestión, observándose lo siguiente: En la micrografía (figura 4), se observa una estructura cavernosa con varios poros en la parte central, así como también una partícula prismática en el fondo de un poro (a) que sugiere la presencia de planos cristalinos de corte, asimismo también se observa la típica macla de albita (b), además de pequeños agregados de configuración no uniforme adosados a la estructura cavernosa, pequeñas partículas amorfas y estructuras aparentemente hexagonales y cúbicas (c) en la parte superior izquierda. La morfología anterior sugiere la presencia de arcillas alumínicas en este suelo, así como también material amorfio, cuarzo y en apariencia caolinita por las estructuras simétricas.



**Figura 4.** Micrografía MEB de un terrón de suelo feozem háplico.

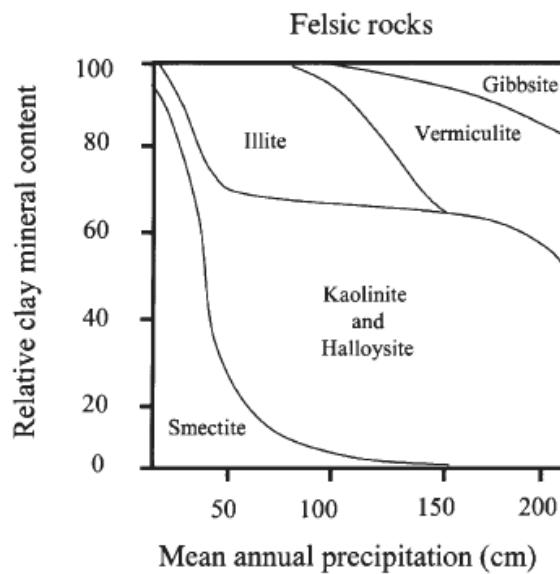
## ANÁLISIS QUÍMICO

Se realizó microanálisis elemental cuantitativo por EDS, de una muestra representativa previamente preparada del suelo, y se obtuvieron los porcentajes atómicos con una estequiométría de óxidos. Este análisis químico revela un enriquecimiento de silicio, lo cual le confiere una afinidad félscica (tabla 1), es decir, que en este suelo persiste la influencia de las rocas de las formaciones geológicas que suministraron el material (rocas félscicas predominantemente) [3], tobas riolíticas, riolita, pórfidos riolíticos, andesita y brecha andesítica. Por otro lado la alta proporción de aluminio es un indicador de actividad hidrotermal con minerales como la albita.

**Tabla 1.** Análisis elemental por EDS del suelo usado en el presente estudio.

Elemento	% en peso	% atómico	Compuesto%	Formula
Na-K	0.17	0.15	0.23	Na <sub>2</sub> O
K-K	1.22	0.65	1.46	K <sub>2</sub> O
Ca-K	1.09	0.57	1.53	CaO
Mg-K	1.13	0.98	1.88	MgO
Al-K	11.42	8.88	21.57	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Si-K	30.36	22.67	64.94	SiO <sub>2</sub>
Fe-K	5.60	2.11	8.01	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ti-K	0.13	0.06	0.21	TiO <sub>2</sub>
Zn-K	0.16	0.05	0.16	ZnO
O-K	63.88	48.72		
Total	100.00			

Finalmente y considerando que el propósito de este trabajo es conocer la mineralogía y composición química de este suelo con fines de estabilización, se tiene que, de acuerdo a la figura 6 [3], para este suelo con un contenido de arcilla entre 18 y 35%, y tomando en cuenta la precipitación pluvial anual de la ciudad de Pachuca que varía de 400 a 900 mm, así como también el entorno de rocas félscicas, los minerales que predominan son la caolinita y la haloisita, por lo tanto se confirman los resultados preliminares de difracción de rayos X específicamente para la caolinita, mineral de arcilla que es responsable del comportamiento geotécnico difícil de este suelo de la ciudad de Pachuca.



**Figura 6.** Proporción relativa de los diferentes minerales de arcilla en función del tipo de roca y la precipitación [3].

#### 4. CONCLUSIONES

Se logró identificar de manera preliminar en el suelo estudiado, cuarzo (01-082-0511), cuarzo  $\alpha$  (01-079-1914), caolinita (00-003-0059), y albita (99-100-0713), utilizando una fuente de Coal y haciendo uso de los archivos de difracción en PDF. Por medio de MEB-EDS se determinó la presencia de minerales de alteración hidrotermal como son caolinita y albita, lo cual es concordante con los resultados de DRX. Se confirmó la ocurrencia del mineral de arcilla (caolinita) en el suelo estudiado, tomando en cuenta la precipitación pluvial anual de Pachuca, así como su entorno félscico.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. *Carta Geológico-Minera Pachuca, F14-D81, Escala 1:50000*, Estado de Hidalgo 2005, [www.sgm.gob.mx](http://www.sgm.gob.mx).
2. RODRÍGUEZ, T. Procesos de intemperismo en tepetates y su influencia en la formación de suelos. *Tesis de Maestría*, Colegio de Postgraduados Montecillo, México, 1999.
3. BARSHAD, I. The effect of variation in precipitation on the nature of clay mineral formation in soils from acid and basic igneous rocks. *Proceedings International Clay Conference*, Jerusalem 1966, 167-173.

## DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN MUESTRAS DE SUELO, COMO INDICADOR EN EL RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN DE ÁCIDOS HÚMICOS (AHs)

S. Nieto-Velázquez, K. Carpio-Domínguez, M. E. Páez-Hernández

Área Académica de Química, Ciudad del Conocimiento, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo.

nieto@uaeh.edu.mx

### RESUMEN

En esta investigación se realizó la determinación de los porcentajes de: carbono orgánico total (%COT), materia orgánica (%MO) y nitrógeno (%N) en tres muestras de suelo (Atotonilco, Tulancingo y Real del monte) del estado de Hidalgo, como un indicador o parámetro relacionado con la calidad y la obtención de un alto rendimiento de ácidos húmicos (AHs). Empleando los métodos de Walkley y Black (1979) (por volumetría y espectrofotometría), se obtuvo el 1.26-1.69% COT, 2.17-2.91% MO y 0.109-0.145% N para la muestra de suelo Atotonilco (SA) mostrando un resultado muy cercano al 5% de MO tal y como se reporta en la literatura, sin embargo estos resultados son mayores comparados con las muestras de suelo Tulancingo (ST) y Real del monte (SRM). Por otro lado, al realizar la extracción de AHs por el método de Kononova (1982), el cual es un método económico, rápido y eficiente, se pudo corroborar que con la muestra de ST también se extrajo AH, obteniendo un rendimiento de extracción del 4% y del 7% para el SA. Se encontró una relación del %MO con el *porcentaje de rendimiento de extracción* de los AHs, llevado a cabo el siguiente orden: SA > ST. Es importante señalar que los valores obtenidos (%COT, %MO y %N) de la muestra de SRM son muy similares al ST, no obstante, con este tipo de suelo no se logró precipitar al AH, suponemos que por la elevada concentración de hierro que presenta y la formación de posibles interacciones moleculares con el AH en medio ácido (AH-Fe). Por lo cual, se continúa con la caracterización de estas tres muestras de suelo para aumentar la calidad y el porcentaje de rendimiento de extracción de los AHs.

**Palabras Clave:** Suelo, COT, MO, AHs, Rendimiento de extracción.

### ABSTRACT

The analysis of total organic carbon (%TOC), organic matter (%OM) and nitrogen (%N) in three soil samples (Atotonilco, Tulancingo and Real del monte) of Hidalgo state were performed in this work. These parameters were used as an indicator of the amount and the quality of humic acids (HAs) present in the soil samples. For the Atotonilco sample soil (AS) values of 1.26-1.69% of TOC, 2.17-2.91% for OM and 0.109-0.145% of N were obtained using the Walkley and Black methods (titration and spectrophotometric techniques, respectively). Regarding to the organic matter percentage (%OM) just the Atotonilco sample (AS) had a value close to that reported in the literature

(5%); the others soil samples, Tulancingo (TS) and Real del Monte (RMS), were even lower. On the other hand, the extraction of HAs was performed with the method of Kononova, an economic, fast and efficient method. Using this method, the HA content obtained from TS and AS was 4% and 7%, respectively. According to this, a correlation between %OM and the amount of HA in the soil was found, in the following order: **AS > TS**. In the case of RMS sample, their percentages of TOC, OM and N are similar to the TS sample; however, the HA extraction from RM soil was not possible probably because of the high concentration of iron in the samples, and the formation of molecular interactions HA-F in acidic medium. Therefore, the characterization of the three soil samples will continue in order to increase the quality and the amount of HAs extracted.

**Palabras Clave:** Soil, TOC, OM, HAs, HAs extraction

## 1. INTRODUCCIÓN

Los suelos son sistemas complejos formados principalmente por materia inorgánica y materia orgánica (MO), como principal clasificación de la MO se divide en moléculas pequeñas (aminoácidos, carbohidratos, proteínas, péptidos, lípidos, ácidos orgánicos de bajo peso molecular, entre otros) y en sustancias húmicas (SHs), también conocidas con el nombre de humus [1]. Existen cuatro mecanismos teóricos propuestos acerca del proceso de formación de las SHs, interviniendo en cada uno de ellos múltiples moléculas y una gran diversidad de reacciones químicas, así es posible observar que la formación de estas sustancias puede deberse a diversos mecanismos de reacción, a pesar de que la mayoría de los investigadores están a favor del mecanismo basado en la condensación de compuestos fenólicos y quinonas [1-2]. Las SHs están formadas por huminas (Hs), ácidos fúlvicos (AFs) y ácidos húmicos (AHs), que logran extraerse de forma separada de acuerdo a la solubilidad que presentan en diferentes disolventes [3-4]. Las características físicas y químicas de los componentes de las SHs (AHs, AFs y Hs) difieren principalmente por la intensidad de color, la variación en el peso molecular, grado de polimerización, tipo y número de grupos funcionales, acidez total (AFs 9-14 meq/g, AHs 4-8.7 meq/g) y solubilidad [5]. Por otro lado, es importante mencionar que los AHs se consideran los componentes principales de la MO de suelo, agua y sedimentos, son insolubles en medio acuoso bajo condiciones ácidas ( $\text{pH} < 2$ ) pero son solubles a valores de pH mayores; tienen una carga negativa y su color en solución es café [6-7]. Todas las características que se acaban de mencionar se deben a la gran cantidad y variedad de grupos funcionales que poseen en su estructura, sobre todo grupos carboxílicos y fenólicos (-COOH y -OH). Es por ello que pueden interaccionar con todo tipo de iones metálicos, agroquímicos, elementos radioactivos, entre otros. Modificando la transferencia, fijación o biodisponibilidad de los iones en sistemas ambientales. Los AHs están encontrando amplias aplicaciones en diferentes áreas como en medicina, donde se han utilizado para cuestiones terapéuticas, como antisépticos y además se ha divulgado su actividad como antiinflamatorios. En agronomía se utilizan como abono orgánico cuya aportación al suelo incrementa su fertilidad (mejorando la relación agua-aire, su textura, la porosidad, la cantidad de nutrientes y disminuyendo la erosión ocasionada por el agua y el viento) y por lo tanto, su productividad. En química o ingeniería ambiental se han utilizado como compuestos poliméricos para la composición de membranas en la construcción de electrodos selectivos de iones, como compuestos adsorbentes de contaminantes y en la formación de hidrogeles. En los campos de

la industria se utilizan como aditivo de cemento y cerámicos, en los cosméticos como faciales, entre otras aplicaciones. Es por ello que en este trabajo de investigación se pretende determinar el porcentaje de carbono orgánico total (%COT), porcentaje de materia orgánica (%MO) y el porcentaje de nitrógeno (%N) en tres muestras de suelo (Atotonilco, Tulancingo y Real del monte) del estado de Hidalgo, como un indicador o parámetro relacionado con la calidad y la obtención de un alto rendimiento de AHs [8-9], con la finalidad de aplicar un método de extracción que sea económico rápido y eficiente.

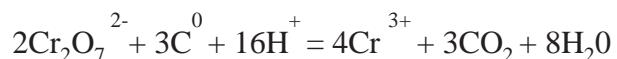
## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

- **OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO.**

Se muestraron tres suelos de lugares no contaminados en el estado de Hidalgo (Atotonilco, Real del Monte y Tulancingo), son suelos de lugares boscosos con constante degradación o transformación de la biomasa vegetal y animal. Las muestras obtenidas se secaron a una temperatura de 60 °C, posteriormente se tamizaron hasta obtener un tamaño de partícula de 1.0 mm y se colocaron en recipientes completamente limpios y herméticos.

- **DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE: CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT), MATERIA ORGÁNICA (MO) Y NITRÓGENO.**

La cuantificación de materia orgánica en suelo, agua, sedimentos y durante las diferentes etapas de extracción de las SHs, se obtiene a partir del contenido de COT con el método de Walkley y Black (1979) descrito por García y Ballesteros (2005) [10]. El análisis consiste en la oxidación de carbono con dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) en un medio fuertemente ácido hasta la formación de  $CO_2$ , según la siguiente ecuación química:



La cantidad de oxígeno utilizado para oxidar el carbono orgánico se determina por la diferencia entre la cantidad de  $K_2Cr_2O_7$  requerido en la oxidación y la que quedó después de ésta, es decir valorando el exceso de  $K_2Cr_2O_7$  con una solución de sal de Mohr (sulfato ferroso amoniacal  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ). Otro método por el cual también se puede cuantificar el COT es mediante una técnica espectroscópica (espectrofotómetro LAMBA 40) a una longitud de onda de 590 nm [10].

*(a) Determinación de COT por un método volumétrico.*

Procedimiento:

Por este método el COT se cuantificó pesando 0.25 g de muestra de suelo ya preparada como se describió anteriormente, se colocó en un matraz Erlenmeyer de 125 mL, por triplicado (realizando

también un blanco). Posteriormente, se les adiciono 5 mL de  $K_2Cr_2O_7$  0.17 M girando el matraz para que entre en contacto con toda la muestra, se agregó cuidadosamente 10 mL de  $H_2SO_4$  concentrado girando nuevamente el matraz y agitando durante un minuto con mucho cuidado evitando salpicaduras. Se dejó reposar durante 30 min en la campana de extracción, se añadieron 2.5 mL de  $H_3PO_4$  concentrado para evitar interferencias con  $Fe^{3+}$ , se adicionaron de 1 a 2 gotas del indicador (difenilamina al 0.5% en ácido sulfúrico). Finalmente se valoró con una disolución de  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$  0.5 N gota a gota hasta un punto final de color verde brillante.

El porcentaje de CO se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$COT (\%) = (V_B - V_M) / g \text{ (muestra)} * N * 0.3 * 1.30 \quad (1)$$

Donde:

$V_B$  = Volumen gastado de  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$  en el blanco

$V_M$  = Volumen gastado de  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$  en la muestra

$g$  = Cantidad en gramos de muestra de suelo

$N$  = Normalidad de la solución de  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$

**0.3** = Factor

**1.30** = 100/77 considerando que el 77% del carbono fue oxidado

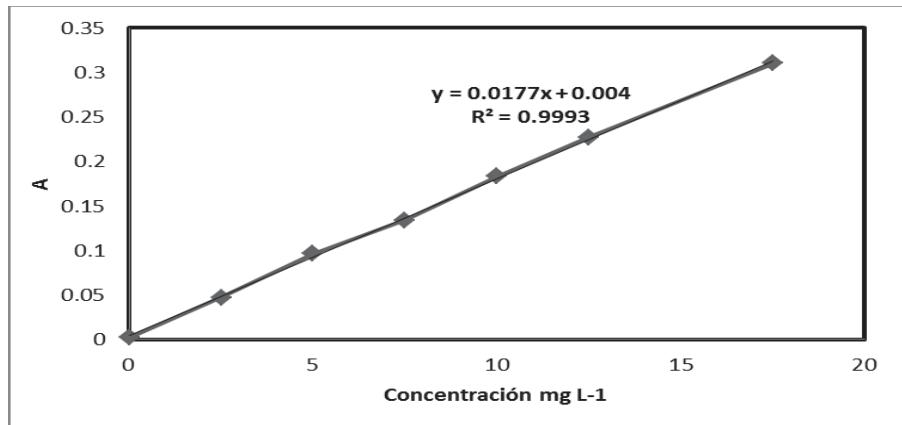
**1.724** = 100/58 considerando que la MO contiene 58% de CO

*(b) Determinación de COT por un método espectrofotométrico.*

Procedimiento:

Para determinar el contenido de COT en las tres muestras de suelo, se colocaron 0.25 g de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL por triplicado (realizando también un blanco). Posteriormente, se adicionaron 5 mL de  $K_2Cr_2O_7$  0.17 M y 10 mL de  $H_2SO_4$  concentrado, se agitaron por 1 min y se dejó reposar por 30 min en la campana de extracción, posteriormente se completó el volumen a 100 mL con agua destilada, luego se dejó enfriar y reposar durante toda la noche. Finalmente se determinó la absorbancia a 590 nm en un espectrofotómetro.

Previamente se realizó una curva de calibración a partir de una solución madre de sacarosa al 5%, de la cual se tomaron alícuotas de 5, 10, 15, 20, 25 y 35 mL que se aforaron a 100 mL (Figura 1). De cada una de las soluciones preparadas se tomaron 2 mL, y se siguió el mismo procedimiento descrito para las muestras de suelo.



**Figura 1.** Curva de calibración de COT.

Sé calculó el porcentaje de materia orgánica y nitrógeno a partir del porcentaje de COT [11-12].

$$\text{COT (\%)} = (A_B - A_M)/m * 0.3 * 1.30 \quad (2)$$

$$\text{MO (\%)} = \text{COT} * 1.724 \quad (3)$$

$$\text{N (\%)} = \frac{\text{MO}}{20} \quad (4)$$

**Donde:**

**A<sub>B</sub>** = Absorbancia del blanco

**A<sub>M</sub>** = Absorbancia de la muestra

**m** = Pendiente de la ecuación de la curva de calibración

**0.3** = Factor

**1.30** = 100/77 considerando que el 77% del carbono fue oxidado

**1.724** = 100/58 considerando que la MO contiene 58% de CO

- EXTRACCIÓN Y PURIFICACIÓN DE AHS PROVENIENTES DE SUELO.**

Una muestra de suelo (Atotonilco, Tulancingo o Real del monte) se preparó mediante un proceso de secado (60 °C) y tamizado con una malla de 1.0 mm de tamaño de partícula para la extracción del AH. Se pesaron 15 g y se transfirieron a un matraz Erlenmeyer con capacidad de 250 mL. Posteriormente, se agregaron 120 mL de una solución recién preparada de Na<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>.10H<sub>2</sub>O e NaOH, (11.15 g de Na<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>.10H<sub>2</sub>O y 1 g de NaOH en 250 mL de solución) a pH ≈ 13; el matraz se cerró perfectamente con una septa para evitar la entrada de CO<sub>2</sub> y se mantuvo en agitación durante 30 min después de lo cual, se dejó reposar toda la noche para finalmente filtrar utilizando papel filtro

Whatman No. 42. Al filtrado obtenido se le añadió aproximadamente 1.5 mL de HCl concentrado, se agitó cuidadosamente y se dejó reposar hasta observar la precipitación del AH. La mezcla se filtró a vacío utilizando membranas Millipore de tipo GVHP 0.22  $\mu\text{m}$ . El sólido se secó en la estufa a una temperatura de 60°C durante 2 h aproximadamente; se retiró y se colocó en el desecador alrededor de 30 min y finalmente se pesó [1]. Las muestras obtenidas se reservaron para su posterior caracterización con diferentes técnicas analíticas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE: CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT), MATERIA ORGÁNICA (MO) Y NITRÓGENO.

En la determinación de los porcentajes de: **COT** y **MO** descritas anteriormente y obteniendo los resultados tal y como se presentan en las siguientes tablas (Tabla 1 y 2), podemos observar que el mayor porcentaje en ambos parámetros y por los dos métodos utilizados, se obtuvieron del suelo de Atotonilco (**SA**) comparado con el suelo de Tulancingo (**ST**) y Real del Monte (**SRM**). Sin embargo en los resultados obtenidos del ST y SRM difieren por ambas técnicas (por vía húmeda y espectrofotométrica), sobre todo los datos del SRM. Es importante mencionar que al realizar los experimentos correspondientes utilizando los dos métodos por valoraciones y espectrofotometría se pudo observar que el método espectroscópico es más reproducible y estable.

**Tabla 1.** Determinación del %COT, %MO y %N por volumetría.

Muestra	%COT	%MO	%N
Atotonilco	<b>1.26 (3.28)</b>	<b>2.17</b>	<b>0.109</b>
Tulancingo	<b>0.57 (4.79)</b>	<b>0.98</b>	<b>0.049</b>
Real del Monte	<b>0.39 (4.71)</b>	<b>0.67</b>	<b>0.034</b>

(en paréntesis %DSR de diez análisis)

**Tabla 2.** Determinación del %CO, %MO y %N por espectroscopia.

Muestra	%COT	%MO	%N
Atotonilco	<b>1.69 (2.45)</b>	<b>2.91</b>	<b>0.145</b>
Tulancingo	<b>0.67 (4.68)</b>	<b>1.16</b>	<b>0.058</b>
Real del Monte	<b>0.96 (5.57)</b>	<b>1.66</b>	<b>0.083</b>

(en paréntesis %DSR de seis y nueve análisis)

Los porcentajes de nitrógeno encontrados en las muestras de suelo van relacionados con el %MO y obteniendo su valor con la ecuación 4, por otro lado, al llevar a cabo una comparación del %N en las tres muestras de suelo como se puede observar en las Tablas 1 y 2, el SA es el que presenta mayores valores por los dos métodos (valoraciones y espectrofotometría), puede deberse a que proviene de un

lugar con constante degradación de biomasa vegetales y animal, no obstante este nitrógeno está formando firmes enlaces químicos en las macromoléculas del humus. Así, en lo que respecta a los tres suelos en estudio como ya se mencionó, el SA presenta un mayor porcentaje de COT y MO en comparación con las otras dos muestras, no obstante son parámetros de referencia muy importantes para la obtención de AHs sin dejar a un lado diversos factores (clima, biomasa vegetal y animal, grado de humificación, entre otros) que también influyen en la obtención de estos compuestos con gran cantidad y variedad de grupos funcionales, principalmente grupos carboxílicos e hidróxidos fenólicos.

Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de extracción de estos ácidos con las tres muestras de suelos, obteniendo un rendimiento de extracción del 4% para el ST y del 7% para el SA. Sin embargo, con el SRM no se logró precipitar al AH, probablemente se deba a la alta concentración de hierro en el suelo ya que durante los experimentos se pudo observar residuos (limadura) en el agitador magnético y el color característico rojizo de la muestra, podría deberse a interacciones del metal con el AH en medio ácido, sin embargo se continuará con la identificación y cuantificación de hierro en la muestra de SRM por espectroscopia de absorción atómica. Por lo cual se permanece con la caracterización de estas tres muestras de suelo para aumentar la calidad y el porcentaje de extracción de las macromoléculas de AH.

#### 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo representa un estudio completo de caracterización de tres muestras de suelo con base al %COT, %MO y %N obteniendo resultados muy acertados y reproducibles, y sobre todo se encontró una relación con el *porcentaje de rendimiento de extracción* de los AHs (SA > ST), sin embargo hay dos factores importantes en los cuales se continua trabajando, el primero es lograr que no haya diferencias significativas en los dos métodos utilizados (valoraciones y espectrofotometría), y por otro lado continuar con la caracterización de metales interferentes en el proceso de extracción de los AHs.

#### AGRADECIMIENTO

Silvia Nieto Velázquez agradece el financiamiento **PROMEP** con no. de oficio de liberación: DSA/103.5/14/10566.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. KONONOVA, MM. *Materia Orgánica del Suelo*. 1ra. ed. Barcelona, España: Oikos-tau, 1982. p. 63-105.
2. FLAIG, W. *The chemistry of humic substances, in the use of isotopes in soil organic matter studies*. Report of FAO/IAEA Technical Meeting. New York. 1966. p. 103
3. DAVIES, G., GHABBOUR, EA., STEELINK, C. *Humic acids: Marvelous products of soil chemistry*. Chem Educ, 2001, vol 78, p.1609-1614.
4. SWIFT, R.S. *Organic matter characterization*. (chap 35). In D.L. Sparks et al. (eds) *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*. Soil Sci. Soc. Am. Book Series: 5. Soil Sci. Soc. Am.

- Madison, WI. 1996, p. 1018-1020. Consultado el 25 de noviembre del 2014 en [www.humicsubstances.org/soilhafa.html](http://www.humicsubstances.org/soilhafa.html).
5. STEVENSON, F.J. *Humus Chemistry: Genesis, Composition and Reactions*. (2da. Edición). New York: Wiley Interscience. 1994.
  6. NOVÁK, J., KOZLER, J., JANOS, P., CEZIKOVÁ, J., TOKAROVÁ, V., MADRONOVÁ, L. *Humic acid from coals of the North-Bohemian Coal Filed I.Preparation and characterization*. React. Funct. Polym. 2001, vol 47, p. 101-109.
  7. MADRONOVÁ, L., KOZLER, J., CEZIKOVÁ, J., NOVÁK, J., JANOS, P. *Humic acid from coals of the North-Bohemian Coal Filed III. Metal-binding properties of humic acids-measurements in a column arrangement*. React. Funct. Polym. 2001, vol 47, p.119-123.
  8. OSTROWSKA, A. POREBSKA, G. *Assessment of the C/N ratio as an indicator of the decomposability of organic matter in forest soils*. Ecological Indicators. 2015, vol. 49, p. 104–109.
  9. SMOLANDER, A. LOPONENB, J. SUOMINENA, K. KITUNEN, V. *Organic matter characteristics and C and N transformations in the humus layer under two tree species, Betula pendula and Picea abies*. Soil Biology & Biochemistry. 2005, vol. 37, p. 1309–1318.
  10. GARCÍA, G., BALLESTEROS, G.M. *Evaluación de parámetros de calidad para la determinación de carbono orgánico en suelos*. Revista Colombiana de Química. 2005, vol 34, no. 2, p. 201-209.
  11. NIETO-VELÁZQUEZ, S. *Estabilidad de los Ácidos Húmicos y su Influencia en la Interacción con Cu(II) y Pb(II)*. (Tesis de Doctorado), Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca Hgo; México. (2010).
  12. ISLAS-VALDEZ, S. *Evaluación de la efectividad biológica de la aplicación de biofertilizante líquido en el cultivo de cebada (hordeum vulgare l.)*. (Tesis de Maestría). Universidad Politécnica de Pachuca. Zempoala Hgo; México. (2014).

## DESCRIPCIÓN DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS PLEGADAS MEDIANTE LA GEOMETRÍA DIFERENCIAL

José Cruz Escamilla-Casas<sup>a</sup>, A. Blanco-Piñón<sup>a</sup>, I. Castillo-Pérez<sup>a</sup>, E. Cruz-Chávez<sup>a</sup>, L. E. Ortiz Hernández<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
jocesca@uaeh.edu.mx

### RESUMEN

En Geología Estructural, tradicionalmente la descripción de pliegues se ha hecho utilizando el modelo de pliegues cilíndricos. En consecuencia, la información geométrica fundamental se reduce a 2D. Lo anterior se debe a que en el modelo cilíndrico, todas las secciones transversales perpendiculares a los ejes de los pliegues son idénticas. Alternativamente, la creciente utilización de datos tridimensionales, tales como los colectados mediante GPS, sensores remotos, sísmica tridimensional de reflexión, etc. han permitido el uso de la geometría diferencial para la descripción minuciosa de estructuras geológicas plegadas. Consecuentemente, la geometría diferencial, constituye una herramienta novedosa e imprescindible para cuantificar rigurosamente la geometría medida y modelada de estructuras geológicas. En el presente trabajo, se hace referencia al concepto de curvatura geológica para la descripción de estructuras plegadas a través del método de la geometría diferencial. Adicionalmente, se sugiere la aplicación de este método para describir otros tipos de estructuras, ya que proporciona un marco de referencia para la descripción cuantitativa de superficies curvas y planas. Así mismo, se presenta un ejemplo de aplicación para el análisis y cuantificación de pliegues geológicos, a través de representaciones gráficas generadas mediante la compilación de códigos en MATLAB®. Se hace una comparación ilustrada entre el método de la geometría diferencial y el método convencional, tomando en cuenta las bondades, eficacia y versatilidad de cada uno para la descripción de estructuras geológicas. Finalmente, se presenta la exemplificación sobre el uso del método de la geometría diferencial para el modelado de estructuras plegadas. Esto último se hace considerando que el modelado es parte fundamental y crítica de la Geología Estructural y de la exploración actual, *e. g.* por hidrocarburos, minería, etc.

**Palabras Clave:** pliegues, geometría diferencial, curvatura geológica, modelado, geología estructural.

### ABSTRACT

Traditionally, in structural geology the description of folds has been made by means of the cylindrical model. Consequently, the fundamental geometric information is reduced to 2D because in the cylindrical model, all sections perpendicular to the fold axis are identical. On the other hand, the progressive use of 3D data such as GPS, remote sensing, 3D seismic reflection etc. has promoted the

application of differential geometry in the description of folded structures. Therefore, differential geometry has become a new and powerful tool to rigorously quantify both, the modeled and measured geometry of geologic structures. In this work, the concept of geologic curvature is applied for the description of folded structures by using differential geometry. Additionally, the use of this method is strongly suggested, because it provides a reliable framework for the quantitative description of either, plane and curved surfaces. For such, a sample application is presented here for the analysis and quantification of geologic folds through graphic representations and compiled MATLAB® codes. An illustrated comparison between the traditional method and the differential geometry for the description of geological structures is presented here, by taking into account the versatility, efficiency, and benefits of each. Finally, a worked example is presented to illustrate the use of differential geometry in the modeling of folded structures; bearing in mind that modeling is a fundamental component of modern Structural Geology and critical for the actual exploration techniques, *e.g.* oil, mining, etc.

**Keywords:** folds, differential geometry, geologic curvature, modeling, structural geology.

## 1. INTRODUCCIÓN

La descripción de estructuras geológicas ha sido tradicionalmente efectuada a partir de datos bidimensionales colectados en el campo y haciendo uso de la brújula tipo Brunton. Es decir, una estructura plana se describe mediante lecturas de rumbo y echado. Así mismo, las estructuras lineales se describen por medio de pares de lecturas que corresponden a la dirección y a la inclinación. A partir de esos pares de lecturas, se derivan los datos en estructuras asociadas entre sí tales como el “pitch”, “rake”, echado aparente y el buzamiento, este último se considera aquí como la dirección del echado. En el caso particular en estructuras plegadas, las descripciones se hacen suponiendo que estas se han formado bajo la generatriz de un cilindro en el espacio.

Incluso las estructuras que se generan por una generatriz cónica, se consideran finalmente cilíndricas ya que un segmento de un cono puede ser inscrito dentro de un segmento de un cilindro. Sin embargo, cuando esos segmentos son pequeños, el modelo cilíndrico falla en la descripción de la estructura plegada. Para tal efecto, es necesario aplicar nuevos métodos que permitan la descripción de estructuras plegadas tanto cilíndricas como no cilíndricas. Un ejemplo de lo anterior es el caso del análisis de estructuras plegadas mediante la red estereográfica. El uso de la red estereográfica es un método efectivo y tradicional, pero que trabaja asumiendo que los pliegues son cilíndricos y adicionalmente, cuenta con la limitante de no poder diferenciar entre una estructura sinforme y una antiforme o entre un anticlinal y un sinclinal. Por otro lado, las estructuras plegadas no necesariamente tienen una dirección en la cual su geometría permanece constante. Un ejemplo de estructuras de este tipo son las que se analizan con fines económicos como lo es en la exploración petrolera. Por lo tanto, se hace patente la necesidad de describir y analizar a las estructuras plegadas en tres más que en dos dimensiones.

Los métodos actuales que analizan la curvatura de superficies geológicas, se basan en la geometría diferencial, un campo de las matemáticas que trata de la descripción de curvas y superficies curvas. Algunas de estas técnicas ya se utilizan de manera cotidiana en trabajos modernos de geología estructural y han sido adoptados para usarse en múltiples aplicaciones.

En la primera parte de este trabajo, se hace una discusión breve sobre las clasificaciones para visualizar y describir pliegues geológicos. En la segunda parte, se presenta el ejemplo de un pliegue analizado matemáticamente en 3D mediante un código compilado en el programa computacional MATLAB® [1]. Finalmente, se hace una comparación entre ambos métodos.

## 2. ASPECTOS TEÓRICOS

La parte teórica de este estudio consiste en repasar los conceptos que dan soporte al método de la geometría diferencial aplicada a la descripción y cuantificación de estructuras geológicas. El término curvatura se utiliza para describir como una superficie cambia su forma localmente. Generalmente se puede distinguir entre curvatura extrínseca (la cual siempre depende de cómo un objeto está colocado en el espacio) y la curvatura intrínseca, la cual corresponde al interior del objeto y que puede ser descrita mediante la métrica de Riemann).

Esto es, en la geometría intrínseca, dos superficies son iguales si es que es posible que una se transforme en la otra sin que exista deformación, por ejemplo, un cilindro localmente es un plano. Mientras que en la geometría extrínseca, debe existir una isometría en  $R^3$  entre los dos objetos, es decir, un plano y un cilindro son dos objetos diferentes. Aunque se consideran en la aplicación del método, los términos estándar de la geometría diferencial no se discutirán a fondo, ya que rebasarían el alcance del presente trabajo; *e.g.* el operador de forma y la primera y segunda formas fundamentales [2]. Por otro lado, en cuanto al objeto central del presente trabajo, los pliegues son superficies geológicas que pueden ser determinadas de manera única por medio de su curvatura. De ahí que su clasificación debe basarse en los valores de curvatura.

Por sus generatrices, los pliegues pueden ser cilíndricos o desarrollables. Los pliegues desarrollables se forman por una superficie regulada donde las generatrices son adyacentes, es decir, líneas inclinadas que se intersectan mutuamente en un punto. Alternativamente, existen las superficies no desarrollables y son aquellas en las cuales las líneas inclinadas o generatrices no se intersectan mutuamente.

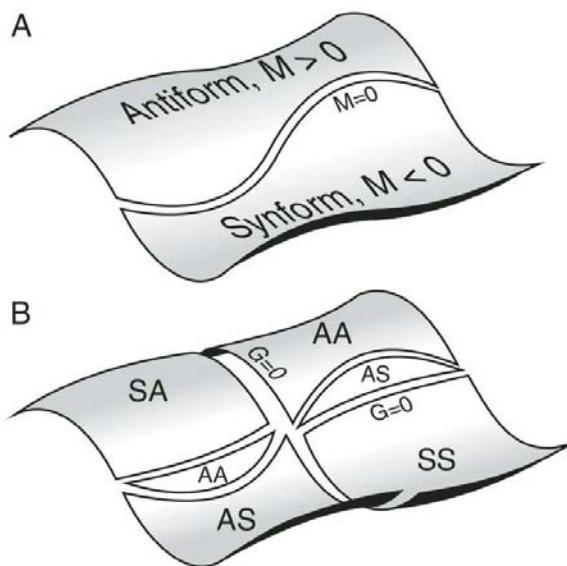
## 3. CURVATURA GEOLÓGICA

Las técnicas nuevas proporcionan datos en 3D (*e.g.* los sondeos sísmicos y los levantamientos con GPS de alta precisión) que indican que los pliegues en la naturaleza muy frecuentemente difieren significativamente del modelo cilíndrico. La geometría diferencial se hace útil en este aspecto cuando resuelve el problema de clasificación al hacer uso de los signos de curvatura.

La curvatura Gaussiana y la curvatura promedio, en particular, proporcionan las herramientas necesarias para este fin. Las descripciones de pliegues en 3D pueden ser consultadas en la literatura, siendo las más sobresalientes las propuestas por Mynatt et al. [3] (Fig. 1) y la de Lisle y Toimil [4] (Fig. 2).

	$k_G < 0$	$k_G = 0$	$k_G > 0$
$k_M < 0$	synformal saddle	synform	basin
$k_M = 0$	perfect saddle	plane	
$k_M > 0$	antiformal saddle	antiform	dome

**Figura 1.** Clasificación de la curvatura geológica de Mynatt [3]. La curvatura geológica en un punto sobre la superficie puede ser determinada a partir de las curvaturas media y Gaussiana en ese mismo punto.



**Figura 2.** Partición de la superficie del pliegue para definir pliegues separados de acuerdo a Lisle y Toimil [4]: A. La línea de curvatura media cero ( $M$ ) separa antiformes de sinformes. B. Las líneas de curvatura Gaussiana cero ( $G$ ) permiten la subdivisión en cuatro tipos básicos de sinformes y antiformes: SA sinclástico antiforme, AA anticlástico antiforme, AS anticlástico sinforme, SS sinclástico sinforme.

Para capturar la información geométrica cuantitativa de las superficies geológicas, tanto los pliegues naturales como teóricos, se han utilizado los algoritmos de Mynatt [3]. A pesar de que los geólogos tienden a aproximar los pliegues a la generatriz cilíndrica, estos no son realmente así en la naturaleza. Por otro lado, ha resultado útil la aproximación de algunas estructuras a formas idealizadas, y cuantificar cuán alejada está la superficie geológica de la idealizada.

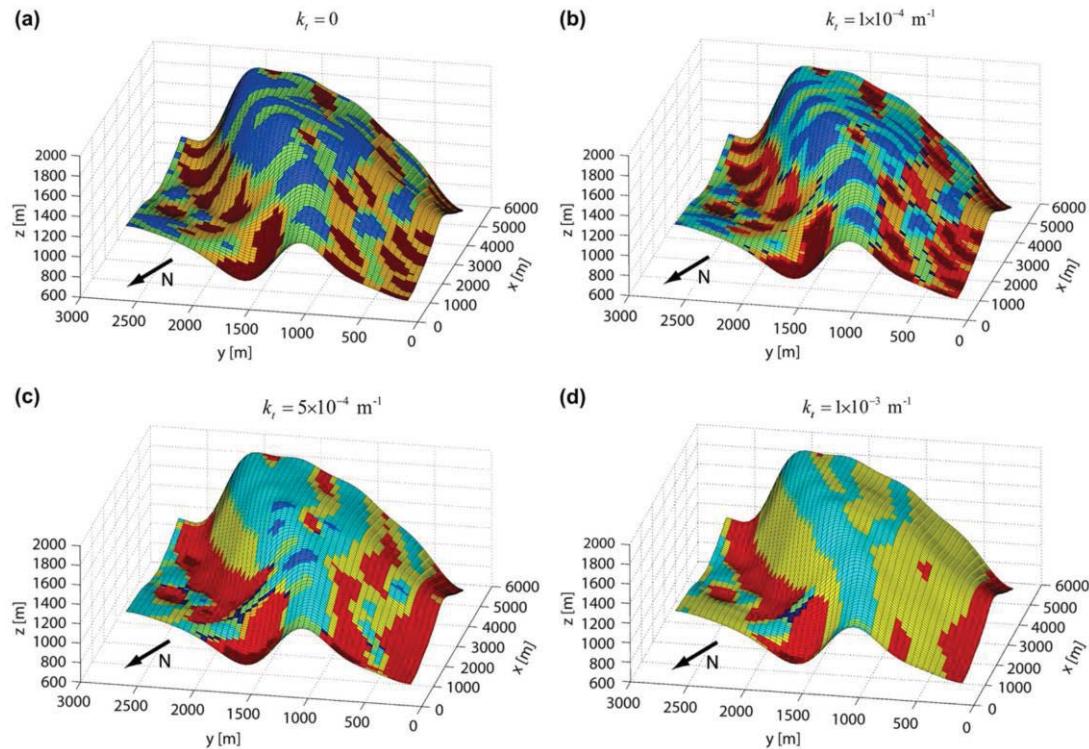
El umbral de curvatura de Bergbauer  $k_t$  [5], especifica un valor absoluto de curvatura debajo del calculado a partir de las curvaturas principales con cualquiera de los dos signos y se fijan en cero. Éste valor hace que las superficies puedan ser clasificadas como sinformes, antiformes o planas. Así mismo, las sillas de montar (saddles) pueden ser localizadas en los puntos de la superficie en donde  $|k_{min} + k_{max}| < k_t$ .

#### 4. LA PROYECCIÓN ESTRATIGRÁFICA Y LA GENERATRÍZ CILÍNDRICA

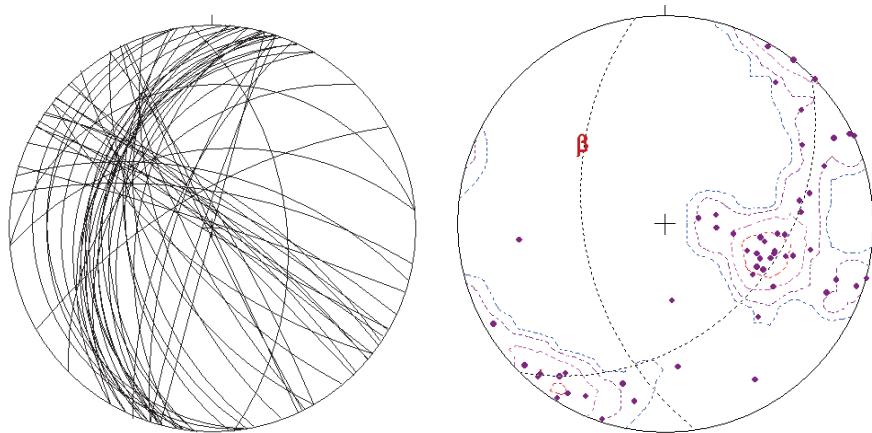
La proyección estereográfica, por otro lado, ha sido un instrumento ancestral utilizado en la antigua Grecia desde el siglo II a.C. Ha ganado una gran popularidad debido a la facilidad con la que se pueden analizar las actitudes geológicas de planos, líneas y pliegues. Originalmente inició su popularidad entre los cristalógrafos, quienes adaptaron el método para describir ampliamente las propiedades ópticas y morfológicas de los cristales.

Para el análisis de pliegues mediante la proyección estereográfica, es necesario tener una población de datos que sobrepase las 50 entradas. Así mismo, es requisito indispensable que la colección de datos puntuales sea obtenida en ambos limbos del pliegue. Una vez realizado el gráfico de los círculos mayores que representan los datos de los limbos, los cuales se consideran estructuras planas, se procede a generar los polos de los planos. De esta manera, los polos formarán cúmulos representando un polo general de cada limbo. La perpendicular al círculo Pi y el eje Beta, representan el plano axial y el eje axial, respectivamente [6].

En el método de la proyección estereográfica, se puede tener una aproximación bastante acertada de lo que es la actitud geológica del plano y del eje axial. Por consiguiente, el método considera que el pliegue es geométricamente cilíndrico. Por otro lado, al ser proyectados los datos de los limbos, las ubicaciones geográficas pierden sentido, ya que en la proyección estereográfica, solamente se consideran las direcciones e inclinaciones de los planos y líneas que conforman o que son parte de las estructuras geológicas.



**Figura 3.** Figura mostrando la curvatura geológica de pliegues aleatorios así como las variaciones en la geometría. El código de colores corresponde a los mostrados en la Figura 1. Desde (a) hasta (d), los valores del umbral de la curvatura ( $k_r$ ) han sido cambiados para así simplificar los componentes de la estructura y mostrar únicamente a los más importantes.



**Figura 4.** Proyección estereográfica de los flancos de un pliegue (izquierda) y sus respectivos polos (derecha),  $n=56$ . Los flancos se consideran estructuras planas. A partir de los cúmulos que forman los polos, se puede inferir la actitud estructural del plano y eje axial (B).

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las descripciones básicas de los pliegues se basan en el supuesto de que son cilíndricos, esto es que la superficie plegada puede ser descrita mediante sinformes y antiformes en dos dimensiones. Las superficies geológicas, sin embargo, son naturalmente no cilíndricas y por consiguiente, mucha de la información geométrica se pierde en las descripciones simplistas actualmente en uso. A partir de los trabajos de Mynatt [3] y Lisle y Toimil [4] se generan las clasificaciones que se basan en la descripción cuantitativa del pliegue utilizando la curvatura.

La curvatura es un concepto claramente explicado en la geometría diferencial y es ampliamente descrito mediante la primera y segunda forma fundamental. Los coeficientes de estas formas, en cambio, determinan la curvatura máxima y la curvatura mínima en cada punto de la superficie. Ambos valores, su promedio (curvatura media) y su producto (curvatura Gaussiana) son cantidades muy útiles para examinar superficies geológicas. La curvatura geológica es una combinación de la curvatura media y la curvatura Gaussiana (Fig. 3).

Por otro lado, la proyección estereográfica, se limita a un gráfico bidimensional en el que únicamente se pueden considerar las direcciones e inclinaciones de los elementos de un pliegue. La proyección estereográfica no es una herramienta que pueda soportar la descripción en 3D de las superficies plegadas (Fig. 4).

## 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha examinado el método tradicional de la proyección estereográfica y el método novedoso de la geometría diferencial para describir y clasificar pliegues. Ambos métodos tienen ventajas y desventajas y esas mismas son las que dan lugar a las siguientes conclusiones: El método de la proyección estratigráfica tiene la ventaja de poder ser utilizada en campo, en sitios donde no hay electricidad, ni mucho menos acceso a la red. El gráfico que fue creado en la proyección estereográfica, concentra todos los datos y a partir de ahí genera una aproximación estadística de la orientación de los elementos del pliegue (eje y plano axiales). La proyección estratigráfica impide diferenciar entre un sinforme y un antiforme. La proyección estratigráfica no permite detectar variaciones en la geometría de la estructura plegada. El método de la geometría diferencial, es una herramienta que no puede aplicarse manualmente. Requiere de un ordenador y un software especializado, *e.g.* MATLAB®. La compilación de los algoritmos puede resultar un tanto complicada. Se requiere de equipo costoso y de alta precisión para colectar los datos, como lo es una unidad GPS. La generación de gráficos a diferentes resoluciones es factible mediante el método de la geometría diferencial con lo que se genera un cambio en el nivel de resolución. La geometría diferencial, es un método que debe ser empleado más frecuentemente con la finalidad de perfeccionarlo y desarrollarlo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. MATLAB®, R.2011b, The MathWorks Inc., Natick, MA, 2011.
2. KUNZINGER, M. *Differential Geometry I. Lecture Notes.* 2008. URL <http://www.mat.univie.ac.at/~mike/teaching/ss08/dg.pdf>.
3. MYNATT, I. BERGBAUER, S. and POLLARD, D. Using differential geometry to describe 3-D folds. *Journal of Structural Geology*, 2007, Vol. 29, p. 1256-1266.

4. LISLE, R. and TOIMIL, N. Defining folds in three-dimensional surfaces. *Geology*, 2007, vol. 35, p. 519-522.
5. BERGBAUER, S. The use of curvature analysis of folding and fracturing with application to the Emigrant Gap Anticline, Wyoming. PH.D Thesis, Stanford University, Stanford.
6. PHILLIPS, FC. Use of the stereographic projection in structural geology, *Hodder & Stoughton Educational; 3rd edition*, ISBN-13:978-0713123418, 1977, p. 96.

## DISTRIBUCIÓN DE DEPÓSITOS MINERALES EN EL ESTADO DE HIDALGO Y SU RELACIÓN CON LAS PROVINCIAS GEOLÓGICAS

Luis Enrique Ortiz-Hernández, J.C Escamilla-Casas, A. Blanco-Piñón, E. Cruz-Chávez

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo

leoh@uaeh.edu.mx

### RESUMEN

El Estado de Hidalgo se sitúa en México central y constituye un sitio privilegiado desde el punto de vista geológico, ya que confluyen en su territorio cuatro provincias geológicas diferentes: la porción sudoriental del Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas, que cubre aproximadamente el 55% del estado; la porción oriental de la Faja Volcánica Transmexicana, que abarca el 25% del territorio estatal; la terminación meridional del Miogeoclinal del Golfo de México, que comprende el 10% del estado y finalmente la terminación sudoriental de la Plataforma de Valles-San Luis Potosí, que conforma el 10% restante. Los depósitos minerales se distribuyen en todas las provincias geológicas que confluyen en el territorio hidalguense, pero son más abundantes en el Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas y en la Faja Volcánica Transmexicana. La presencia de litologías y estructuras geológicas propicias, hace que existan depósitos tipológicamente diversos y de edades diferentes. Se hace un análisis sucinto de su distribución. El territorio hidalguense, aunque pequeño, suministra diversos recursos (manganese, plata, plomo, zinc, oro, cobre, arcillas, carbonato de calcio, cantera, pómex, mármol y cemento, entre otros), lo que explica el por qué, la minería ha estado en auge desde hace más de 500 años.

**Palabras Clave:** Depósitos minerales, metálicos, no-metálicos, Hidalgo, provincias geológicas.

### ABSTRACT

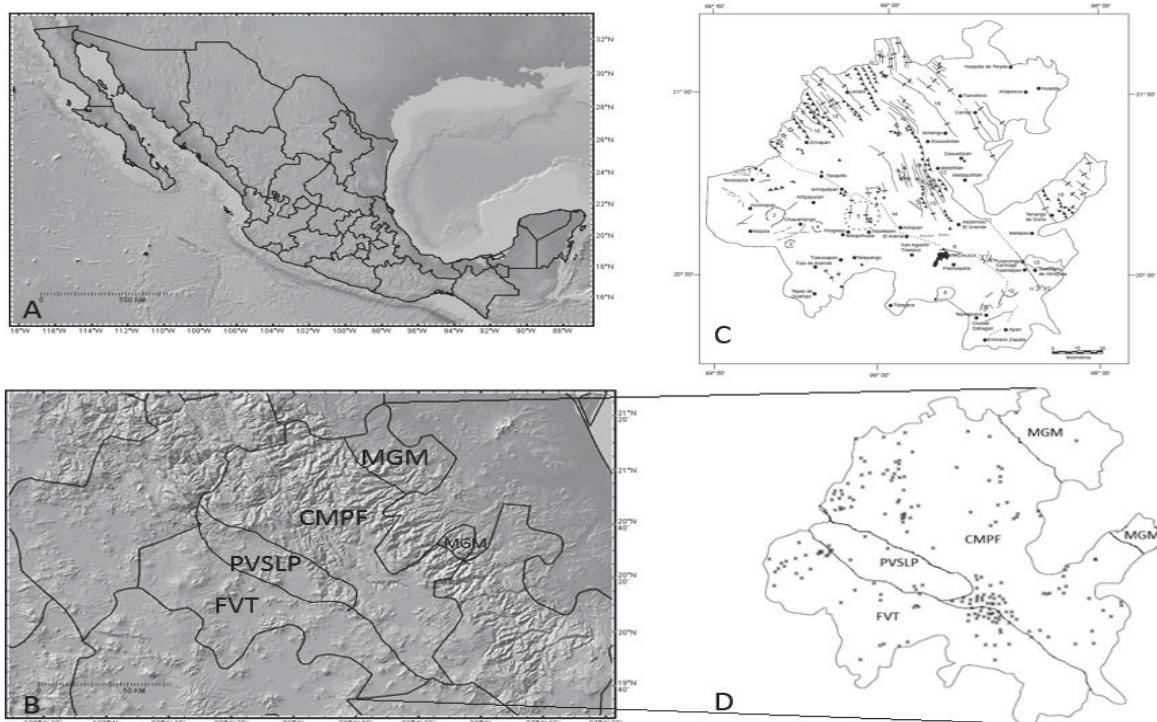
In the state of Hidalgo, central Mexico, concur four geological provinces, with a wide variety of geologic contexts: the southeastern portion of the Folded and Faulted Mexican Belt, covering 55% of the Hidalgo state, the eastern segment of the Trans Mexican Volcanic Belt, covering 25% of the state, the southern edge of the Gulf of Mexico Geocline (10% coverage), and the southeastern edge of the Valles-San Luis Potosí Platform, covering the remainder 10%. Ore deposits are present in the assemblage of the geological provinces of the Hidalgo state, but they are mostly widespread in the Folded and Faulted Mexican Belt and the Trans Mexican Volcanic Belt. From the point of view of their typology and age, both, lithological and geological favorable structures are responsible for the occurrence of diversified ore deposits. This work is a short analysis of the ore deposit distribution in the State. Compared with the extension of Mexico, state of Hidalgo has a short extension; nevertheless, it is the source of raw material as well as manganese, silver, lead, zinc, gold, copper, claystones, calcium carbonate, quarry, pumice stone, marble, and cement industry. The abovementioned deposits explain the more than 500 years mining boom of the state of Hidalgo.

**Keywords:** ore deposits, metallic, non-metallic, Hidalgo State, geologic provinces.

## 1. INTRODUCCIÓN Y MARCO GEOLÓGICO

En el estado de Hidalgo, situado en México central (Figura 1A): confluyen cuatro provincias geológicas [1], a saber (Figura 1B): La porción sudoriental del Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas (CMPF) de edad Mesozoico, origen sedimentario marino y ambiente geotectónico orógeno, que cubre el 55% del estado, la porción oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) de edad Cenozoico, origen volcánico y ambiente geotectónico de arco continental, que abarca el 25% del territorio estatal, la terminación meridional del Miogeocinal del Golfo de México (MGM), de edad Cenozoico, origen sedimentario marino y ambiente geotectónico de geoclinal, que comprende el 10% del estado y finalmente, la terminación sudoriental de la Plataforma de Valles-San Luis Potosí (PVSLP) de edad Mesozoico, origen sedimentario marino y ambiente geotectónico de plataforma, que conforma el 10% restante (Tabla 1).

Esto hace a Hidalgo un estado litológicamente diversificado, ya que su armazón geológico consiste de un basamento precámbrico, rocas paleozoicas marinas que ocurren en la porción nororiental del estado (Formación Tuzoncoa con fauna del Pérmico) [2]), lechos rojos continentales y una gran acumulación (3 000 m de espesor) de sedimentos marinos, ambos del Jurásico.



**Figura 1.** Localización del estado de Hidalgo en México central (A)(tomado de [3]), provincias geológicas que lo conforman (B), FVT=Faja Volcánica Transmexicana, PVSLP=Plataforma de Valles-San Luis Potosí, CMPF=Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas, MGM= Miogeocinal del Golfo de México. Rasgos estructurales más notables mostrando principales ejes de pliegues, lineamientos, fallas y estructuras circulares (C) y distribución de depósitos metálicos y no metálicos (D). Los límites de las provincias geológicas son aproximados.

El Mesozoico está representado esencialmente por lutita, lutita calcárea, arenisca, limolita y conglomerado de la Formación Huizachal del Triásico Superior (2 000 m de espesor), por sedimentos clásticos marinos y continentales del Jurásico Inferior, que son cubiertos por rocas marinas clásticas y calcáreas del Jurásico Medio y Superior. El Cretácico Inferior es esencialmente de naturaleza calcárea (depósitos de la cuenca intracratónica de Zimapán y de la plataforma de Valles-San Luis Potosí), mientras que en el Cretácico Superior se depositaron sedimentos tipo flysch.

Estas formaciones sedimentarias están plegadas y falladas con orientación predominante NW-SE.

El Terciario debuta con depósitos marinos (lutita y arenisca) del Paleoceno-Eoceno Inferior de las formaciones Velasco y Chicontepec. Estos depósitos están distribuidos en la porción nororiental del estado, y constituyen la provincia geológica del Miogeoclinal del Golfo de México, que es una acumulación de sedimentos marinos cenozoicos esencialmente detríticos, que incluyen la planicie costera del Golfo de México.

No obstante, el Terciario en el estado de Hidalgo es predominantemente volcánico y está representado por el Grupo Pachuca (Oligoceno-Mioceno) [4], que comprende ocho formaciones volcánicas con derrames andesíticos-dacíticos, tobas y brechas cubiertas por derrames y tobas riolíticas-dacíticas y escasos basaltos, que en conjunto alcanzan un espesor de 2 000 m y cubren discordantemente a sedimentos cretácicos.

Derrames y aglomerados andesítico-dacíticos con intercalaciones de basalto de la Formación Las Espinas [5], se interdigitan localmente con la Formación El Morro, del Paleoceno-Eoceno [6].

En la región noroccidental del estado existen domos riolíticos y basaltos que arrojan edades isotópicas  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  miocénicas ( $7.7 \pm 0.1$  a  $7.1 \pm 0.2$  Ma; [7]), aunque algunas secuencias volcánicas arrojan edades isotópicas pliocénicas como las andesitas, riolitas, tobas y basaltos extravasados hace 4.5 Ma, durante la actividad volcánica de la caldera de Huichapan [8], los derrames de basaltos interestratificados con ignimbritas alcalinas con edad isotópica 4.4 Ma [9], en la región de Tulancingo, los basaltos de Atotonilco El Grande ( $2.38 \pm 0.008$  Ma y  $2.56 \pm 0.08$  [9]) y los basaltos columnares de Santa María Regla de  $1.8 \pm 0.4$  Ma [10].

En la Tabla 1 se muestra un resumen de principales rocas o formaciones y depósitos asociados.

**Tabla 1.** Provincias geológicas, edad, ambiente geotectónico, rocas o formaciones que las constituyen, así como los tipos de depósitos asociados.

PROVINCIA GEOLÓGICA	EDAD	ORIGEN	AMBIENTE GEOTECTÓNICO	PRINCIPALES ROCAS O FORMACIONES	DEPÓSITOS ASOCIADOS
Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas	Mesozoico	Sedimentario marino	Orógeno	Basamento precámbrico, rocas paleozoicas marinas, lechos rojos continentales y	Skarns de Zn, Ag, Pb ( $\pm$ W), skarns de Fe, Cu, Au, Mn sin-sedimentario, caolín en

				rocas sedimentarias calcáreo-detriticas del Mesozoico, Formación Las Espinas (Oligoceno-Plioceno medio), Formación El Morro (Paleoceno-Eoceno)	domos riolíticos, caliza, barita, cantera, arena, grava, sílice, diatomita y carbón.
Faja Volcánica Transmexicana	Cenozoico	Volcánico	Arco continental	Grupo Pachuca (Oligoceno-Mioceno), Secuencias volcánicas indiferenciadas del Terciario, complejos de domos riolíticos	Cantera, grava, pómez, sílice, caolín, tezontle, bentonita, carbonato de calcio, mármol, dolomita, depósitos epitermales de Ag, Au, Pb y Zn
Plataforma de Valles-San Luis Potosí	Mesozoico	Sedimentario marino	Plataforma	Secuencias calcáreo-pelíticas del Cretácico Inferior y depósitos tipo flysch del Cretácico Superior	Diseminaciones y vetas de Au, Ag, Pb, Zn, en riolitas, diatomita, mármol, carbonato de calcio, yeso
Miogeoclina 1 del Golfo de México	Cenozoico	Sedimentario marino	Geoclinal	Depósitos marinos (lilita y arenisca) del Paleoceno-Eoceno Inferior de las formaciones Velasco y Chicontepec	Carbón

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se comparó la distribución de los depósitos minerales que ocurren en el Estado de Hidalgo y se efectuó la correlación de éstos con las diferentes provincias geológicas [1], que confluyen en el territorio hidalguense.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN (DISTRIBUCIÓN DE DEPÓSITOS MINERALES)

La diversidad de ambientes geotectónicos en el estado, así como la presencia de variadas litologías y estructuras geológicas (Tabla 1 y Figura 1C), hace que existan depósitos de gran riqueza mineral. No obstante que la superficie total concesionada estatal representa sólo un 6.73%, la entidad suministra diferentes minerales metálicos y no metálicos. Los depósitos minerales se distribuyen en todas las provincias geológicas que confluyen en el territorio hidalguense, pero son más abundantes en la FVT, sobretodo en la transición con el CMPF (Figura 1D). Asimismo, las manifestaciones termales se sitúan preferentemente en estas dos provincias geológicas. De acuerdo con el análisis de las mineralizaciones, se constata que la FVT suministra materiales no metálicos principalmente cantera, grava, pómex, sílice, caolín, tezontle, bentonita, carbonato de calcio, mármol y dolomita, además de la mineralización polimetálica (Ag, Au, Pb, Zn) del distrito minero de Pachuca-Real del Monte.

Con lo que respecta al CMPF, suministra una mayor diversidad de sustancias minerales como son: Au, Pb, Ag, Zn, Cu, Fe, manganeso sin-sedimentario, caolín, caliza, barita, cantera, arena, grava, sílice, diatomita y carbón. Hay yacimientos en skarn de Zn, Pb, Ag ( $\pm$ W) y de Fe, Cu, Au que se asocian a los granitoides terciarios, mientras que los depósitos de tipo epitermal polimetálico o de metales preciosos están localizados preferentemente en el contacto entre la FVT y el CMPF.

Otros depósitos minerales están asociados con secuencias volcánicas terciarias o plioceno-cuaternarias, que muestran sobretodo una afinidad magmática calcoalcalina y algunas más con tendencia adakítica. Según [11], existen cuatro episodios volcánicos en el CMPF, que podrían extenderse a la FVT. El más antiguo, andesítico (Formación Las Espinas [11]), ocurrió entre  $38.1 \pm 1.9$  y  $31.1 \pm 1.6$  Ma, el siguiente representado por andesitas y riolitas oligocénicas con edades de  $27.2 \pm 1.4$  a  $25.5 \pm 1.3$  Ma. El tercer episodio volcánico, más diversificado desde el punto de vista magmático, corresponde al Mioceno medio y superior, caracterizado por la presencia de basalto y andesita basáltica con edades de  $15 \pm 0.7$  a  $12 \pm 0.6$  Ma [12] y riolitas con edad de  $8.8 \pm 0.3$  a  $6.7$  Ma. La PVSLP contiene depósitos de Au, Ag, Pb, Zn, diatomita, mármol, carbonato de calcio, así como un depósito de yeso en su porción noroccidental. Finalmente, el MGM sólo contiene tres depósitos de carbón en la Formación Chicontepec (turbiditas) del Paleoceno-Eoceno Inferior, compuesta por lutitas, areniscas y limos.

Se constata que el territorio hidalguense ocupa el primer lugar nacional en producción de manganeso, ha suministrado el 6% de la plata que circula en el mundo, y una gran cantidad de cemento, que representa más del 38% de la producción nacional. Asimismo, el Estado incrementó un 28.7% su producción minera en 2014 con respecto a la del 2013. Los recursos pétreos tales como grava, cantera, arena y piedra pómex son abundantes, así como el carbonato de calcio y dolomita, ya que más del 50% de la entidad hidalguense está conformado por secuencias calcáreas mesozoicas. No obstante, en algunos municipios la producción minera es casi inexistente, como son: Almoloya, Atlapexco, Chapantongo, Chapulhuacán, Huejutla, Huautla, Molango, Pacula, Santiago de Anaya, Tecozautla, Tezontepec de Anaya y Yahualica.

#### 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra que la distribución de los depósitos minerales en el estado de Hidalgo está influenciada por la historia evolutiva de cada una de las cuatro provincias geológicas que lo conforman, pero también por la existencia de estructuras geológicas propicias tales como calderas volcánicas, fallas y pliegues con tendencia predominante NW-SE. Se constata que la mayor diversidad de tipos de mineralización metálica y no metálica se localiza en el CMPF, debido al hecho de tener una historia geológica que abarca desde el Precámbrico al Reciente y por la gran cantidad de procesos mineralizadores a que ha estado sujeta esta provincia. Por una parte, un evento de metamorfismo regional en el Precámbrico, al menos seis episodios de vulcanismo que van desde el Pérmico, el Jurásico Superior, el Terciario y el Plioceno-Cuaternario, dos episodios de magmatismo granítico-diorítico post-laramídicos, un probable rifting en el Jurásico Superior coincidente con la abertura del Golfo de México, así como un lineamiento regional orientado NW-SE, que controla en parte la distribución de menas metálicas y el emplazamiento de domos riolíticos con manifestaciones de caolín (Agua Blanca, San Clemente). La FVT, por su parte, suministra una buena cantidad de materiales no metálicos principalmente, así como la mineralización polimetálica del distrito minero de Pachuca-Real del Monte, debido al hecho de que esta provincia volcánica registra cuando menos cuatro episodios volcánicos y las estructuras volcánicas (calderas, domos, derrames, conos cineríticos) y tectónicas (fallas y fracturas), son propicias para albergar mineralización. La PVSLP, posee depósitos de Au, Ag, Pb, Zn, diatomita, mármol y calcita debido al hecho de que existe encajonante calcáreo y granitoides, y evaporitas en su borde noroccidental. El MGM contiene únicamente depósitos de carbón que fueron formados en la cuenca de Chicontepec. El territorio hidalguense, aunque pequeño, ya que representa sólo el 1.06% de la superficie total del país, suministra una cantidad diversificada de recursos minerales (manganese, zinc, plata, plomo, oro, cobre, caliza, arcillas, calcita, dolomita, mármol y cemento, entre otros), lo que explica el por qué la minería ha estado en auge desde hace más de 500 años.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. ORTEGA-GUTIÉRREZ, F., MITRE-SALAZAR, L. M., ROLDÁN-QUINTANA, J., ARANDA-GÓMEZ, J. J., MORÁN-ZENTENO, D., ALANIZ-ÁLVAREZ, S. A. y NIETO-SAMANIEGO, Á. F., 1992, Texto explicativo de la quinta edición de la carta geológica de la República Mexicana escala 1:2'000,000: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología y SEMIP Consejo de Recursos Minerales, 74 p.
2. ROSALES-LAGARDE, Laura, CENTENO-GARCÍA, Elena, OCHOA-CAMARILLO, Héctor y SOUR-TOVAR, Federico, Permian volcanism in eastern México-preliminary report. En: II Convención sobre la Evolución Geológica de México y Recursos Asociados (Pachuca, Hidalgo, 12-14 de Septiembre 1997), 1997, Libro-guía de las excursiones geológicas, v. 1, excursión 1, p. 27-32.
3. GEOMAPAPP, 2014, Marine Geoscience Data System. Disponible en Web: <http://www.geomapapp.org/>.
4. *Geology and mineral deposits of the Pachuca-Real del Monte district, State of Hidalgo, Mexico.* Consejo de Recursos Naturales No Renovables, 1963, Publication 5E, México, 222 p.
5. *Geología y yacimientos minerales del distrito minero de Zimapán, Hidalgo.* Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales, 1957, Boletín 40, 270 p.

6. CARRASCO-VELÁZQUEZ, B., E., MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, E. y RAMÍREZ-ARRIAGA, E., Estratigrafía de la Formación El Morro del Paleoceno-Eoceno en Zimapán, Hidalgo. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 2009, vol. 61, núm. 3., p. 403-417.
7. SUTER, M., CARRILLO-MARTÍNEZ, M., LÓPEZ-MARTÍNEZ, M., y FARRAR, E. The Aljibes half-graben; active extension in the transition zone between the trans-Mexican volcanic belt and the southern Basin and Range, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 1995, vol. 107, p. 627–641.
8. AGUIRRE-DÍAZ, Gerardo de Jesús y LÓPEZ-MARTÍNEZ, Margarita. Evolución geológica de la caldera de Huichapan, Hidalgo, en base a nuevas edades  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ , Geos, 2001, vol. 21, p. 320-321.
9. CANTAGREL, J.M. y ROBIN, C. K-Ar dating on eastern Mexican volcanic rocks. Relations between the andesitic and the alkaline province. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1979, vol. 5, p. 99-114.
10. NELSON, S.A. y LIGHTHART, A. Field excursion to the Sierra Las Navajas, Hidalgo, Mexico-A Pleistocene peralkaline rhyolite complex with a large debris avalanche deposit. En: II Convención sobre la Evolución Geológica de México y Recursos Asociados (Pachuca, Hidalgo, 12-14 de Septiembre 1997), 1997, Libro-guía de las excursiones geológicas, v. 1 excursión 4, p. 89-96.
11. SILVA-MORA, Luis. Esquema magmático de la Sierra Madre Oriental en la región de Zimapán-Jacala-El Realito, estados de Hidalgo y San Luis Potosí. En: Simposio sobre geología regional de México, 3 (Méjico, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología), 1989, p. 74-77.
12. GARCÍA-PALOMO, Armando, MACÍAS, José Luis., TOLSON, Gustavo, VALDEZ, Gabriel y MORA, Juan Carlos. Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt. Geofísica Internacional, 2002, vol. 41, núm.2, p. 133-150.

## PRIMICIAS EN LA INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DEL DISTRITO MINERO PACHUCA REAL DEL MONTE

José Cruz Escamilla-Casa, E. P. Castañeda-Ovando, J. A. Callejas-López

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
jocesca@uaeh.edu.mx

### RESUMEN

En el Distrito Minero Pachuca- Real del Monte, las bases de la definición y descripción sistemática y a detalle de unidades litológicas y estructuras, tanto en el subsuelo como en superficie, datan de la década de 1960. El trabajo más sobresaliente sobre el tema, fue publicado en 1963 [1]. A partir de entonces, los autores de trabajos más recientes sobre el tema han tenido que enfrentar limitantes tales como el cierre de las minas del Distrito y en consecuencia, al acceso a las obras mineras subterráneas. El acceso a las obras mineras subterráneas es crítico, ya que a finales de la década de 1950, fue posible efectuar muestreos, colecta de datos estructurales y cartografía geológica subterránea. Por otro lado, y en muchos de los casos, la mancha urbana ha obliterado afloramientos de roca críticos para el estudio de las unidades rocosas del distrito, situación que limita de igual forma la ejecución de los trabajos de cartografía geológica. En años recientes, la investigación que se enfoca en las estructuras geológicas de la Sierra de Pachuca, ha permitido identificar diferentes etapas en la historia de la deformación frágil. Sin embargo, la localización de estrías de falla en planos horizontales en diversas localidades, sugiere que dentro del proceso de deformación compresiva, existen fallas inversas de bajo ángulo, mismas que se interpretan como una cabalgadura. Comúnmente, el desplazamiento horizontal en fallas de bajo ángulo se distribuye a lo largo de planos discretos en vez de un solo plano continuo. Los planos discretos son paralelos entre sí y sub horizontales. Los planos de falla encontrados, se localizan entre las cotas 2450 y 2700 msnm, lo que sugiere que los planos que se describen, pueden pertenecer a una falla de desplazamiento horizontal mayor o cabalgadura de escala regional. Por otra parte, paralelamente a los planos con estrías sub horizontales, se observan horizontes de brechas tectónicas compuestas por clastos angulares a sub angulares de material lítico, ocasionalmente mostrando la estructura de dislocación, no cementado y embebido en un material de grano fino del tamaño de la arcilla. Cabe mencionar que los clastos corresponden a fragmentos de roca tanto pertenecientes a las unidades sobreyacentes como a las subyacentes. El objetivo del presente trabajo, es mostrar los avances en la investigación de la deformación frágil en la Sierra de Pachuca, particularmente se pretende mostrar las evidencias en campo de la presencia de una cabalgadura regional. Finalmente, cabe mencionar que es primordial probar la hipótesis de la presencia de la cabalgadura regional dado que, de ser esta cierta, la interpretación actual de la estratigrafía se vería alterada significativamente. Por otro lado, tal reinterpretación serviría de base para realizar estudios más pormenorizados que aportarían datos valiosos para entender la génesis del Distrito Minero Pachuca-Real del Monte, un distrito minero de calidad mundial.

**Palabras Clave:** Sierra de Pachuca, Pachuca-Real del Monte, deformación frágil, falla inversa, cabalgadura regional.

## ABSTRACT

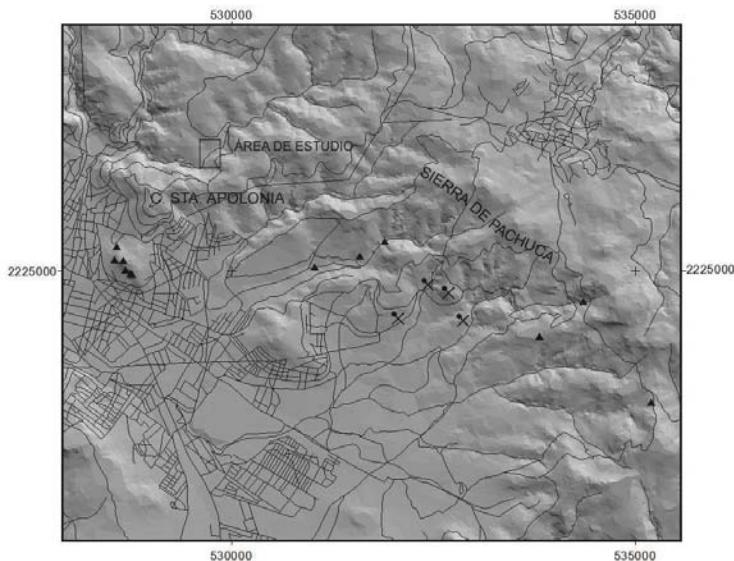
Lithologic units of the Pachuca Real del Monte Mining District were detailed and systematically described in the early 1960s: in 1963, it was published the most remarkable work on this topic [1]. Since then, later authors have faced critical restrictions, such as closed shafts and tunnels and inoperative underground mines. Access to tunnels is vital for subsurface geological survey. Therefore, in the late 1950s it was possible to integrate rock samples, structural data, and integrate detailed underground geologic maps. On top of the above mentioned limitations, urban areas still under development and a number of outcrops have been obliterated. Many of the missing outcrops are critical to correlate rock units within the mining district. Consequently, nowadays geological mapping in this area is, somehow, cumbersome. In recent years, research efforts have been focused on the identification and description of brittle deformation in Sierra de Pachuca. As a result, a number of outcrops with subhorizontal fault planes have been identified indicating the occurrence of low angle regional thrust faults associated with compressional deformation. Commonly, the net displacement in low angle faults is distributed along discrete parallel planes instead of a single plane. The mapped planes in the study area are located within 2450 and 2700 m above sea level, suggesting that this set of sub parallel fault planes belong to a larger regional fault structure. Additionally, paralleling the faulted planes, horizons of tectonic breccias occur. These horizons are composed of angular lithic fragments, occasionally presenting puzzle structure, embedded in a poorly cemented fine grained groundmass. The lithic fragments belong to under and overlying rock units. The objective of this work is to present recent findings of the undergoing research project in Sierra de Pachuca, particularly, to show field evidence of the presence of thrust faulting in the area. Finally, the outreach of this research is to validate the working hypothesis of the presence of a regional thrust fault. If the hypothesis is true, then the actual stratigraphic interpretation will be significantly changed. Moreover, the new interpretation will constitute the foundation for detailed studies that will shed more light on the understanding of the genesis of this world-class mining district.

**Keywords:** Sierra de Pachuca, Pachuca-Real del Monte, brittle deformation, reverse fault, regional thrust.

## 1. INTRODUCCIÓN

La estratigrafía del Distrito Minero Pachuca-Real del Monte (DMPRM) más reciente y actualmente en uso, es la que ha sido elaborada por el Servicio Geológico Mexicano [2], [3]. Sin embargo, tal estratigrafía se basa principalmente en las descripciones y nomenclatura de la columna estratigráfica establecidas por Geyne [1], abarcando rocas cretácicas hasta recientes. Por otro lado, es pertinente resaltar que la mayoría de los contactos entre las unidades volcánicas de tal columna, han sido reportados como discordancias, tanto angulares como erosionales. Los datos estructurales que se muestran en la obra citada, permiten hacer un análisis de las orientaciones preferenciales de los flujos de lava en las diferentes unidades. Los datos de los flujos tienen inclinaciones significativas, indicando que el depósito de las lavas no fue a lo largo de planos horizontales o sub-horizontales, sugiriendo que el depósito ocurrió a lo largo de superficies irregulares producidas por la

paleotopografía o, que posterior al depósito, existieron movimientos tectónicos que bascularon a los paquetes de rocas. Sin embargo, la anterior interpretación promueve a la siguiente pregunta: ¿Los horizontes que separan a las unidades discordantemente, son generadas por erosión? Así mismo, surge la interrogante para poder explicar la presencia de brechas volcánicas basales como componentes de diversas unidades litológicas, e.g. Formación Vizcaína, Real del Monte, etc., que contienen fragmentos líticos de las formaciones sub y supra yacentes. El enfoque del presente estudio, es la inspección meticulosa de los horizontes aflorantes de brecha y que presumiblemente corresponden a las discordancias descritas en la obra ya citada, bajo la hipótesis de que los contactos y brechas reportadas tienen un origen tectónico y no vulcanoestratigráfico. Tal inspección se ha realizado en la porción norte y noreste del Cerro de Santa Apolonia, al norte de la Cd. de Pachuca, Hidalgo en tobas andesíticas de la Formación Vizcaina. Adicionalmente, y en soporte a la hipótesis anteriormente planteada, a lo largo de la Sierra de Pachuca, se han localizado múltiples espejos de falla en planos horizontales a subhorizontales. Las estrías de falla, tienen una orientación NE-SW y E-W. Indicando un transporte de los bloques cabalgantes es de suroeste a noreste (Fig. 1), [4].



**Figura 1.** Mapa de localización del área de estudio con coordenadas UTM (m). Los triángulos muestran los sitios donde se han observado planos de falla subhorizontales. Así mismo, se muestra la localización de las obras mineras abandonadas.

Para probar la hipótesis sobre el origen de las brechas, se ha recurrido al análisis de Fry [5] [6] y al análisis cinemático en los planos y estrías de falla. Lo anterior con la finalidad de establecer las orientaciones de los ejes principales de la elipse de deformación y de los esfuerzos principales,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ . Los análisis realizados en muestras orientadas de roca, demuestran que las brechas observadas si tienen un origen tectónico y que los granos han sido afectados por la deformación frágil. Los resultados que se reportan sugieren la urgente redefinición de la columna estratigráfica de la Sierra de Pachuca bajo el contexto de incluir desplazamientos a lo largo de planos subhorizontales, los cuales probablemente están relacionados con fallas de bajo ángulo o cabalgaduras de escala regional y que el orden de la secuencia en uso de las unidades litológicas, no necesariamente obedece a una secuencia progresiva en tiempo. En cualesquier caso, la conclusión de este estudio en desarrollo hará contribuciones significativas al estudio y entendimiento de la génesis del DMPRM.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

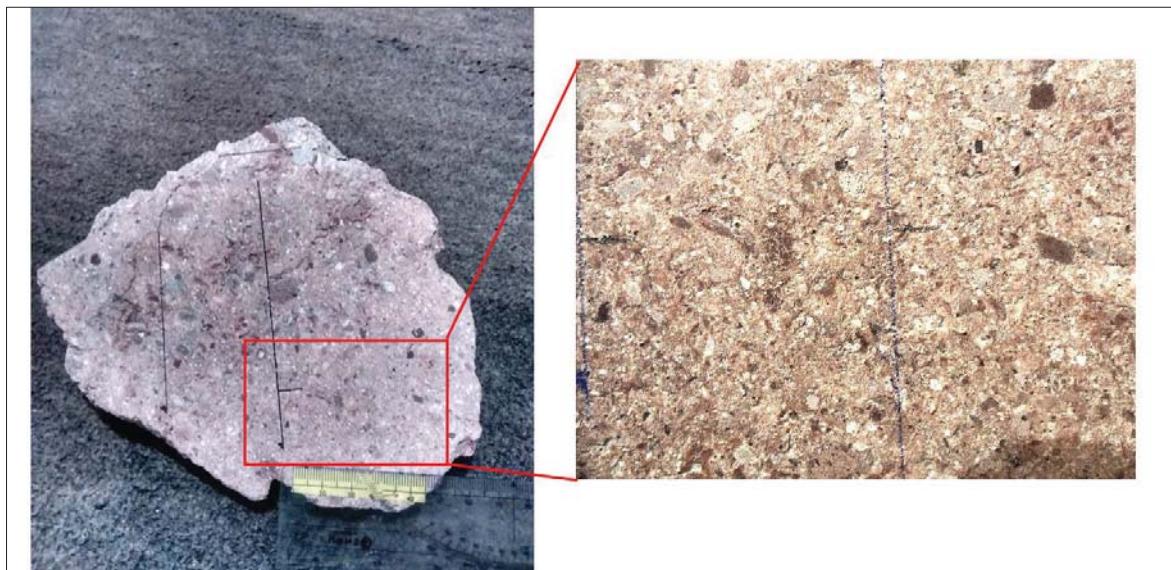
La progresión en este estudio, ha permitido aplicar diversas técnicas, tanto tradicionales como innovadoras. La cartografía y el registro de datos en campo de estructuras planas y lineales, han sido realizados en la forma tradicional, utilizando la brújula tipo Brunton, el navegador personal GPS y la base topográfica geo-referenciada en sus versiones electrónica e impresa, además de los sistemas de información geográfica (SIG). Debido al enfoque principal del estudio que es la deformación frágil, se ha puesto principal atención a los datos estructurales asociados a las fallas, como son: localización de los planos fallados y a la dirección e inclinación de las estrías de falla (Fig. 2). Esto último con la finalidad de determinar el tipo de falla, así como la identificación e interpretación de los indicadores de movimiento de acuerdo a los criterios de Petit [7] y Doblas [8], y establecer el movimiento relativo entre los bloques. La integración de los datos ha permitido crear un nivel de información en el SIG con un total de 35 estaciones en campo y con la base de datos estructurales y de cinemática, ha sido posible aplicar la teoría de Angelier [9] [10] para inferir la orientación de los esfuerzos principales responsables de la deformación frágil en las rocas de la Sierra de Pachuca. Para la integración, síntesis, interpretación de los datos de fallas y determinación estadística de la orientación de los esfuerzos principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ), se utilizó el programa computacional FaultKin v.7 así como la teoría de los algoritmos del programa establecida por Allmendinger [11] [12] [13].



**Figura 2.** Imágenes de los afloramientos en campo. A la Izquierda se muestra el aspecto en campo del afloramiento donde se localizaron los horizontes con brechas. A la derecha se muestra un plano de falla con estrías, la dirección del movimiento es en sentido de la punta del estilógrafo.

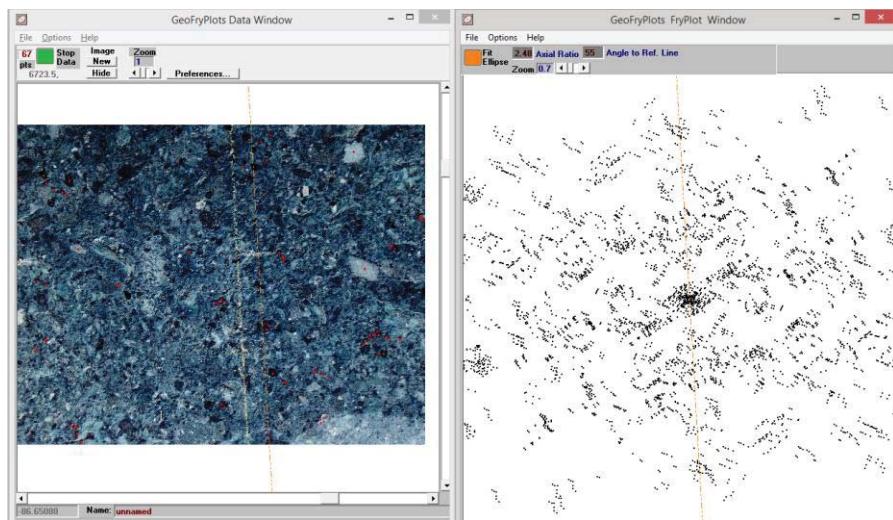
Para probar la hipótesis de que el origen de las brechas encontradas es tectónico y no vulcanoestratigráfico, se empleó el método de Fry [5] [6]. El método de Fry se basa en el supuesto de que una distribución uniforme de puntos no acumulados cambiará después de la deformación a una distribución no uniforme y formará cúmulos. Esto se explica mejor si consideramos que las

distancias entre los puntos después de la deformación aumentarán en el sentido de la extensión máxima y disminuirán en el sentido de la máxima compresión. Por consiguiente, la distancia máxima y mínima será paralela a los semiejes mayor y menor de una elipse, respectivamente. Tal elipse definirá la deformación finita en los puntos sobre el plano analizado. Si el plano está referido, por ejemplo al norte, la orientación e inclinación de la elipse determinará la orientación de los ejes principales de esfuerzo. Si el análisis se lleva a cabo en tres planos perpendiculares entre sí, entonces se podrá definir el elipsoide de deformación. Para la aplicación del método de Fry y determinar la deformación finita plana, se seleccionó una muestra que contiene planos paralelos a los planos que contienen estrías de falla incipientes. Las estrías son los indicadores primarios que sugieren que las brechas en la secuencia volcánica de la Sierra de Pachuca, son de origen tectónico. La muestra orientada se cortó del afloramiento siguiendo el procedimiento descrito por Passchier & Trouw [14]. La actitud estructural del plano de la muestra analizado es 305/16. Dicha muestra presenta estrías de falla subhorizontales con actitudes estructurales de 90/9, 82/11 y 62/14 (E-W y NE-SW). A pesar de que las estrías se observan con claridad, los indicadores cinemáticos no son conclusivos para determinar con certeza el movimiento relativo de los bloques. Posteriormente, se pulió el plano a analizar con un esmeril de disco de diamante de 3 mm, marca Skil modelo 9050 Gtia Bosch, y sucesivamente de manera manual con lijas con granulometrías de 80, 120, 600 y 1000. El proceso de pulido se hace con la finalidad de tener un plano virtualmente libre de rugosidades e irregularidades. Posteriormente, con el uso de una cámara digital convencional de 14 megapixeles, se tomó una fotografía con plano de imagen es paralelo al plano pulido (Fig. 3). El archivo con la imagen se manipuló electrónicamente mediante el procesador de imágenes Paint.NET, para obtener una imagen posterizada y así resaltar los bordes de los granos que constituyen la matriz de la roca. Este último procedimiento permite la localización más exacta de los centros de los granos que son los puntos considerados en el método de Fry [6] (Fig. 3).

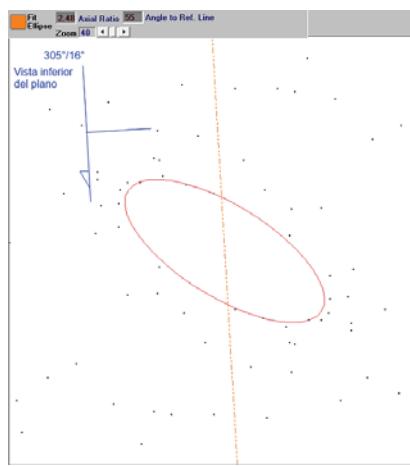


**Figura 3.** Imagen mostrando la muestra considerada para el análisis de Fry. En la imagen de la izquierda se observa el plano pulido, la escala de la regla es en cm. El cuadro en rojo indica la porción del plano considerada para efectuar el análisis.

En la imagen posterizada del plano pulido dentro del entorno del programa computacional GeoFryPlots, a partir de la cual se seleccionaron 67 puntos que representan los centros de los fragmentos líticos, en su mayoría con longitudes que oscilan de 3-5 mm (Fig. 4). Una vez generada la elipse, se puede aplicar la función zoom para visualizar la elipse con claridad. Así mismo, el entorno del programa permite ajustar la elipse de acuerdo a los puntos generados por el programa (Fig. 5).

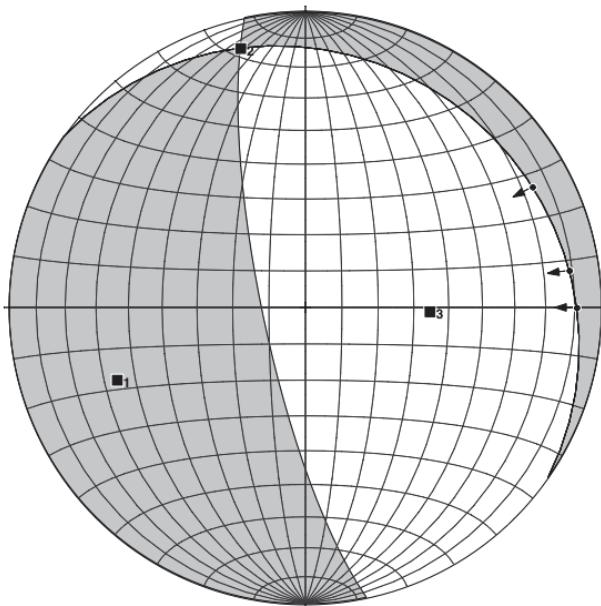


**Figura 4.** A la izquierda se muestra la imagen posterizada del plano pulido que se seleccionó para el análisis de Fry. Las marcas casi al centro de la imagen, corresponden a la línea de referencia y al símbolo que representa la actitud del plano. A la derecha se muestra el resultado del análisis de Fry [6]. La elipse que representa la deformación finita aparece al centro de la imagen.



**Figura 5.** Imagen en el entorno del programa computacional GeoFryPlots [6] mostrando la elipse que representa la deformación finita en el plano analizado, ver texto. Mediante la marca de la esquina superior izquierda, se especifica la posición del plano inferior. Para la interpretación, es necesario girar la imagen para referirla a su posición original.

Con la finalidad de sustentar las observaciones obtenidas con el método de Fry, se realizó el análisis cinemático utilizando los datos de dirección e inclinación de las estrías de falla. Los datos se procesaron en el entorno del programa computacional FaultKin [13]. Considerando la actitud estructural del plano que contiene a las estrías y la dirección e inclinación de las mismas, se generó un gráfico tipo pelota de playa con la proyección estereográfica de las estructuras para calcular las orientaciones de los esfuerzos principales y definir los sectores en donde ocurre la compresión y la distensión (Fig. 6.)



**Figura 6.** Diagrama tipo pelota de playa, generado en el entorno del programa FaultKin [13] con la proyección estereográfica de las estrías de falla y los sentidos de movimiento inferidos (flechas).

Los cuadros llenos indican la dirección e inclinación de los esfuerzos principales. El área sombreada corresponde a la zona de compresión.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se discuten en esta sección, corresponden a los avances en la investigación de la deformación frágil en la Sierra de Pachuca. Particularmente, los resultados que se obtuvieron se enfocan a probar la hipótesis de que las brechas en planos horizontales a subhorizontales no son de origen vulcano-sedimentario, sino de origen tectónico.

Una vez generada la elipse en el entorno del programa computacional GeoFryPlots [6] y tras la reorientación de la imagen para recrear la actitud geológica en campo de la muestra analizada, se obtiene una elipse que representa la deformación finita en el plano con actitud estructural 305/16; con el semieje mayor orientado en una dirección N-S (Fig. 7). El semieje mayor de la elipse indica la dirección de la máxima extensión y perpendicular al mismo y paralela al semieje menor, ocurre la dirección de máxima compresión (dirección E-W). Contrastando las orientaciones de los semiejes de la elipse con las orientaciones de las estrías de falla, se puede observar que tanto la deformación

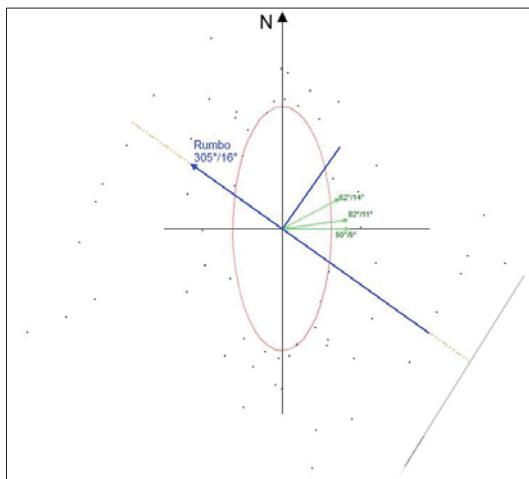
finita determinada analíticamente con el método de Fry y la deformación frágil que originó las estrías son paralelas a subparalelas entre sí. Es decir, de acuerdo a la cinemática que se infiere por las estrías, la orientación de la máxima compresión es subparalela a la dirección del movimiento de los bloques fallados.

**Tabla 1.** Orientaciones de los esfuerzos principales obtenidos mediante el gráfico de tipo pelota de playa.

Esfuerzo	Dirección (°)	Inclinación (°)
$\sigma_1$	249.1	32.3
$\sigma_2$	345.9	10.6
$\sigma_3$	091.8	55.5

Por otro lado, las orientaciones de los esfuerzos principales obtenidas a partir del gráfico tipo pelota de arena, indican que el esfuerzo  $\sigma_1$  es  $20^\circ$  diferente con respecto a la orientación del semieje menor de la elipse obtenida con el método de Fry (Tabla 1).

Es notable la similitud entre las orientaciones de los esfuerzos estimadas por el método de Fry y las orientaciones calculadas mediante el análisis cinemático en el horizonte estudiado. Adicionalmente, las orientaciones presentadas por Escamilla-Casas, et al. [4] también indican paralelismo entre las orientaciones de los esfuerzos principales.



**Figura 7.** Figura mostrando la disposición de la elipse de deformación. La imagen fue rotada para orientarla con respecto al norte magnético. Los segmentos de recta diferentes a los semiejes de la elipse, representan la dirección de las estrías en el plano de falla.

#### 4. CONCLUSIONES

Se comprueba la existencia de horizontes de brecha tectónica, generados por deformación frágil, en la columna estratigráfica volcánica de la Sierra de Pachuca. La brecha tectónica se presenta en planos horizontales o subhorizontales. Las estrías de falla encontradas en los planos de falla paralelos a las brechas tectónicas, indican un movimiento con dirección predominante ENE-WSW. Las orientaciones de los esfuerzos principales son concordantes con la orientación de los semiejes de la elipse que representa a la deformación finita. Las orientaciones de los esfuerzos principales reportadas por Escamilla-Casas et al. [4] son sub paralelas a las obtenidas en el presente estudio. Muy probablemente, los planos de brecha tectónica paralelos entre sí estén asociados a un mismo evento tectónico y en consecuencia, con una estructura geológica mayor de escala regional. Por lo anterior, se sugiere que la reinterpretación de la génesis del DMPRM debe incluir fallas inversas o cabalgaduras que, muy probablemente, sean parte de una estructura de escala regional.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la dirección de la Compañía Real del Monte y Pachuca por permitir el acceso a terrenos dentro de su propiedad, en los que fueron tomadas las muestras analizadas. Particularmente al Lic. José Luis Martínez López Gerente de Recursos Humanos de la Cía. Real del Monte y Pachuca y al Ing. Miguel del Río, Jefe de Geología, por compartir información de la geología superficial.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. GEYNE, AR., FRIES, C., SEGERSTROM, K., BLACK, RF., WILSON IF., "Geology and Mineral Deposits of the Pachuca-Real del Monte District, State of Hidalgo, Mexico", *Consejo de Rec. Min., Publ. 5E*, 1963, 205 p.
2. SÁNCHEZ-ROJAS, LE, ARREDONDO-MENDOZA, JA, CARDOSO-VÁZQUEZ, EA. Carta Geológico-Minera Pachuca, F14-D81, Escala 1:50,000, Estado de Hidalgo. 1998, Secretaría de Economía-Servicio Geológico Mexicano, Mapa Digital, Segunda Edición.
3. SÁNCHEZ-ROJAS, LE, ARREDONDO-MENDOZA, JA, CARDOSO-VÁZQUEZ, EA. Carta Geológico-Minera Pachuca, F14-D81, escala 1:50,000, Estado de Hidalgo. 2005, Secretaría de Economía-Servicio Geológico Mexicano, Texto Explicativo, 115 p.
4. ESCAMILLA-CASAS, JC, ORTIZ-HERNANDEZ, LE, BLANCO-PIÑÓN, A., CRUZ-CHÁVEZ, E., AMBORCIO-CRUZ, SP. Interpretación de la Cinemática de las Fallas Neo-Tectónicas Frágiles del Sector sureste de la Sierra de Pachuca. In *VII Encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales*, 17-19 septiembre de 2014, Pachuca, Hgo. p.67-75. ISSN 2395-8405.
5. FRY, N. Random Point Distribution and Strain Measurements in Rocks, 1979, *Tectonophysics*, vol. 60, p. 89-105.
6. GEOFRYPLOTS, v. 3.1, Holcombe, RJ, Department of Earth Sciences – University of Queensland, Queensland, 4072, Australia, 2003.
7. PETIT, JP. "Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks", *Journal of Structural Geology*, 1987, vol. 9, 5/6, pp. 597-608.
8. DOBLAS, M. "Slickenside kinematic indicators", *Tectonophysics*, 1998, vol. 295, pp. 187-197.

9. ANGELIER J., MECHLER, P. "Sur un méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en seismologie: La methode des diedres droits", *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1977, vol. 19, pp. 1309-1318.
10. ANGELIER J. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology*, 1989, vol. 11, 37-50.
11. MARRETT, RA, ALLMENDINGER, RW. Kinematic Analysis of Fault-Slip Data, *Journal of Structural Geology*, 1990, vol. 12, p. 973-986.
12. ALLMENDINGER, RW, CARDOSO, NC, FISCHER, D. *Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors*: Cambridge, England, University Press, 289pp.
13. FAULTKIN v. 7.4.1, Allmendinger, RW, Cornell University, New York, 2015.
14. PASSCHIER, C, TROUW, W, RUDOLPH, AJ. *Microtectonics*, Springer, 2nd edition, 2005, 366p. ISBN: 3540640037