

# CARACTERÍSTICAS Y CRITERIOS DE IDENTIFICACIÓN DE LAS PSEUDOTAQUILITAS ASOCIADAS A LA FALLA DE LOS PLANES, LA PAZ, B. C. S.

Angel F Nieto-Samaniego<sup>1</sup>, Susana A. Alaniz-Alvarez<sup>1</sup> y Gustavo Tolson Jones<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Geociencias, UNAM, Apdo. Postal 1-742, Querétaro, Qro., 07600

<sup>2</sup>Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, México, D. F., 045 10

## RESUMEN

Una búsqueda somera de la frecuencia con que se abordan temas relacionados con las pseudotaquilas en la literatura internacional y nacional, así como nuestra experiencia personal, muestra que es muy poca la difusión que existe sobre el conocimiento de estas rocas. Observaciones detalladas de los afloramientos del arroyo El Ancón, donde está expuesta una gran cantidad de fracturas y fallas rellenas de pseudotaquilas nos permite ilustrar con fotografías de campo y microscopio una serie de criterios para su identificación para evitar confusiones con milonitas y otras rocas de falla. Se lograron identificar fases vítreas que muestran que muestran texturas fluidales y esferulíticas, así como estructuras de inyección y relleno de fracturas.

Palabras clave: Pseudotaquilas; rocas de falla; deformación frágil; La Paz México

## INTRODUCCIÓN

Las pseudotaquilas son rocas poco comunes cuyas descripciones aparecen de manera muy limitada en los libros de texto de Geología Estructural y cuyo estudio es aún incipiente. Es generalmente aceptado que se las localizan en dos entornos: asociadas a cráteres de impacto y a fallas.

En la literatura internacional son pocos los trabajos que se enfocan al estudio de estas rocas y menos aún a aquellas asociadas a fallas. La información disponible sobre ellas es muy poca, si se compara con el volumen de literatura sobre la mayoría de las rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas; incluso es significativamente menor que el disponible sobre sus "primas", las rocas miloníticas.

Sin pretender que sea una prueba estadística, sino un indicador cualitativo que permita mostrar la diferencia en el número de veces que estas rocas son abordadas en la literatura, en comparación con otros tipos de rocas, realizamos una búsqueda en la base GeoRef; se utilizó una ventana de tiempo de 1970 a 2003 y se llevó a cabo el 16 de Febrero de 2004. Los resultados fueron los siguientes:

Pseudotachylites: 74; Pseudotachylites and fault: 22

Mylonites: 5,052

Rhyolites: 8,105

Basalts: 41,088

Meteorites: 21,584

Por lo que toca a nuestro país, hemos encontrado dos referencias sobre la existencia de pseudotaquilas; una de ellas es una tesis de licenciatura sobre las pseudotaquilas asociadas a la falla de

Los Planes (Puy-Alquiza, 1992), las cuales son el objeto del presente trabajo y, la otra, la tesis doctoral de uno de los autores de este trabajo (Tolson, 1998) donde reporta pseudotaquilas asociadas a la falla de Chacalapa, en el sur de México. Realizamos una búsqueda similar a la que se hizo en GeoRef, pero en la base GEOMEX, la cual se encuentra disponible en la Biblioteca Conjunta de Ciencias de la Tierra de la UNAM y cuenta con 23,888 registros sobre publicaciones nacionales, incluyendo memorias de congresos; la búsqueda arrojó los resultados siguientes:

Pseudotaquilas: 0

Milonitas: 4

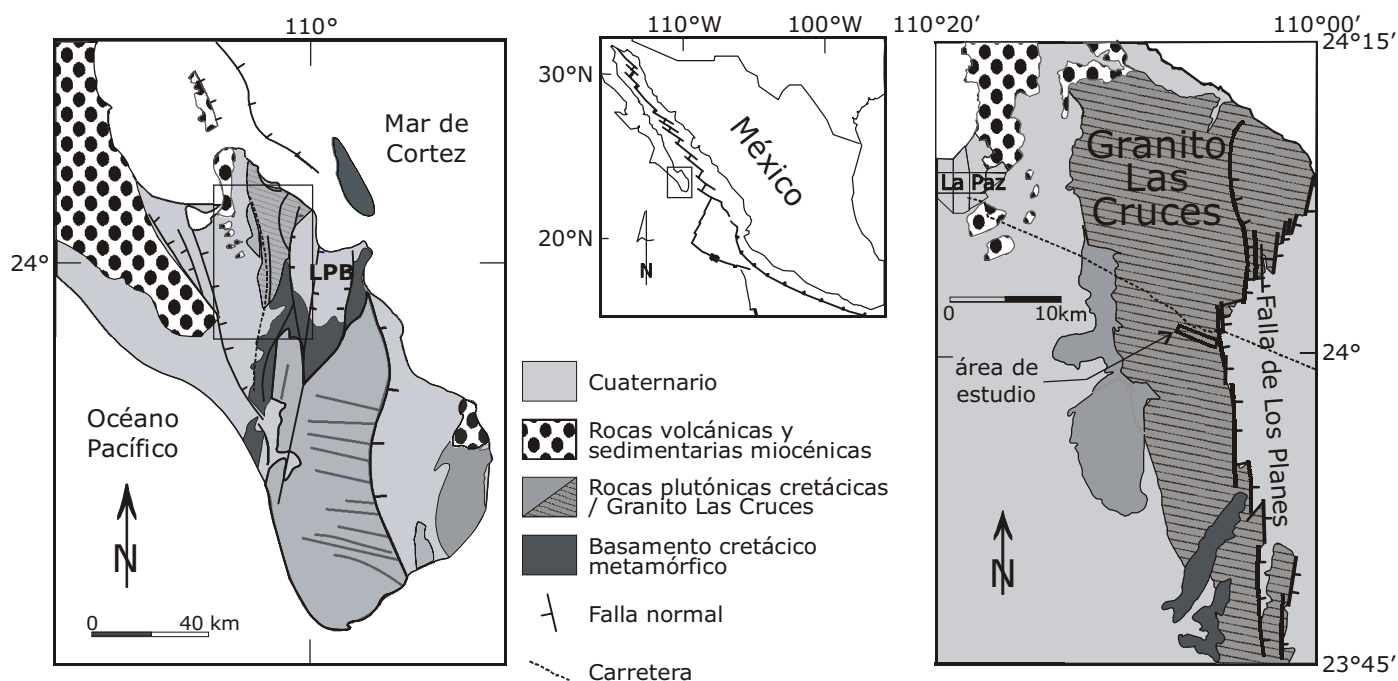
Riolitas: 12

Basaltos: 29

Meteoritos (as): 310

De los resultados obtenidos se observa que no hay una relación con la abundancia de un tipo de rocas, en general o en nuestro país, sino parece más bien que el número de trabajos es proporcional al interés que esos materiales despiertan en la comunidad científica.

Por otra parte, de nuestra experiencia con estudiantes de licenciatura y posgrado, así como con colegas dedicados a muy diversas subdisciplinas de las ciencias de la Tierra, hemos percibido que en general se tiene poco conocimiento sobre las características estructurales y texturales de estas rocas, así como de su significado. Un aspecto muy importante es que se conoce poco sobre los criterios tanto a nivel de afloramiento como microscópicos para identificar estas rocas y distinguirlas de otras rocas de falla. Nos hemos dado cuenta de que la falta de difusión sobre la naturaleza de estas rocas lleva a cometer errores en su interpretación y omisiones en su descripción. Ejemplificaremos lo anterior con el caso del arroyo El An-



**Figura 1.** Mapa de localización del área de estudio donde se muestra de manera esquemática las principales unidades cronoestratigráficas de la región.

cón, localizado muy cerca de La Paz, B. C. S. (Figura 1), en donde la presencia de pseudotaquilitas nos ha sido comentada por los profesores de la carrera de Geología de la Universidad Autónoma de Baja California Sur desde hace más de quince años y ha sido un sitio obligado en excursiones geológicas en la zona.

- El arroyo el Ancón está incluido en el área de tesis de Ramos-Velásquez (1998) la cual, debemos mencionar, es un trabajo sobresaliente y muy cuidadoso en sus descripciones de las unidades y las estructuras presentes en la zona de estudio. En ese trabajo se presenta una descripción detallada de las bandas oscuras que rellenan fallas a lo largo del arroyo el Ancón. De acuerdo con nuestras observaciones estas bandas están constituidas por distintos tipos de rocas de falla, entre las que se encuentran principalmente cataclasitas, algunas milonitas y pseudotaquilitas, cuyas fotografías aparecen a lo largo del presente trabajo. No obstante, Ramos-Velásquez (1998) no detectó la presencia de las fases vítreas (pseudotaquilitas) y reportó solamente cataclasitas, milonitas y ultramilonitas. Tampoco interpretó las características texturales como indicativas de la posible presencia de pseudotaquilita que, por haber sufrido alteración o desvitrificación, pudieran no estar ahora presentes en su estado original.

Considerando lo poco conocidas que son estas rocas, especialmente en nuestro país, nos hemos dado a la tarea de demostrar y difundir la existencia de pseudotaquilitas en los afloramientos donde estamos realizando nuestras investigaciones. Para ello realizamos un muestreo muy cuidadoso del arroyo el Ancón, en busca de evidencias inequívocas de fases vítreas dentro del relleno de las fallas. Producto de ese muestreo es este trabajo, con el que pretendemos difundir, principalmente entre los estudiantes, una pequeña

colección de fotografías que muestran la diversidad de estructuras y rocas de falla que se encuentran asociadas a las pseudotaquilitas, así como de algunos criterios para su identificación.

El trabajo está organizado de la manera siguiente: presentamos una breve introducción sobre las ideas actuales sobre el origen de las pseudotaquilitas, su ocurrencia y posible significado; seguidamente mostramos una serie de fotografías, todas del arroyo El Ancón, con ejemplos a distintas escalas y, por último, una discusión pequeña sobre las perspectivas de investigación en este campo, principalmente en lo que se refiere al proyecto que estamos llevando a cabo.

## NATURALEZA Y ORIGEN DE LAS PSEUDOTAQUILITAS

La pseudotaquilita es una roca compuesta de material vítreo, el cual se considera producto de fusión, debido a la transformación de energía cinética en calor. Hay dos ambientes en los cuales se han reconocido estas rocas: asociados a cráteres de impacto y a fallas. Por otra parte, es generalmente aceptado que pueden distinguirse dos tipos de pseudotaquilitas, atendiendo a los mecanismos que las originaron y que son susceptibles de ser identificadas (véase la pequeña síntesis al respecto en Kenkmann *et al.*, 2000): las que son producto de presión (*shock*), denominadas ya sea Tipo A, Tipo B<sub>1</sub> o Tipo S, según el autor consultado, se caracterizan por su asociación con cráteres de impacto, se presentan en brechas formando vetas, sin que haya una asociación con fallas ni zonas de cizalla simple y los cuarzos contenidos muestran estructuras de *shock* ("cuarzo shockeado") típicos de zonas de impacto meteorítico. Aquellas pro-

ducidas por fricción, denominadas Tipo B, Tipo B<sub>2</sub> o Tipo E, que se identifican por la ausencia de cuarzo con estructuras de *shock*; su asociación con zonas de cizalla simple, con fallas y con otras rocas de falla; forman comúnmente enrejados de fracturas que muestran geometrías asimétricas típicas de zonas de cizalla. En los cráteres de impacto se producen ambos tipos de pseudotaquilitas (las formadas por presión y las formadas por fricción), mientras que en las fallas se considera solamente la existencia de aquellas formadas por fricción. Todos los ejemplos que presentamos aquí corresponden a rellenos de fracturas de varios milímetros de espesor claramente asociados a las fallas macroscópicas y cuya cinemática es sintética con la falla de Los Planes, lo que nos permite suponer que se trata de rocas formadas por procesos friccionales.

Con fines ilustrativos presentamos una corta revisión de los argumentos comúnmente utilizados para mostrar la viabilidad de la fusión por cizalla sobre planos de falla y su asociación con eventos sísmicos (e. g. Sibson 1975, Spray 1995), lo que quizá representa la característica más interesante de ese tipo de pseudotaquilitas. El desarrollo que a continuación se presenta es semejante y sigue en gran parte el presentado por Melosh (2003).

Assumiendo que en un evento de deslizamiento la totalidad del trabajo es convertido en calor, entonces podemos decir que el esfuerzo de cizalla ( $\tau$ ) multiplicado por la velocidad de deslizamiento ( $v$ ) es igual a la energía térmica por unidad de área, formalmente:

$$\dot{Q} = \tau v \quad (1)$$

donde el punto indica que es la cantidad por unidad de tiempo. Se observa que, considerando un esfuerzo de cizalla constante, la energía térmica producida es directamente proporcional a la velocidad del deslizamiento. La energía térmica necesaria para alcanzar la fusión es aproximadamente

$$Q_f = \rho CV (\Delta T), \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la densidad de la roca,  $C$  la capacidad calorífica específica a presión constante,  $V$  el volumen de material que se funde,  $\Delta T$  el incremento de temperatura requerido para alcanzar la fusión.

El aumento de la temperatura por unidad de tiempo será

$$\dot{T} = \frac{\dot{Q}}{\rho CV} = \frac{\tau v}{\rho CV} \quad (3)$$

Para encontrar la magnitud de deslizamiento necesaria para alcanzar la temperatura de fusión ( $d$ ), igualamos (1) y (2) y, considerando que  $Q = \tau vt$ , obtenemos

$$d = vt = \frac{\rho CV (\Delta T)}{\tau} \quad (4)$$

Es interesante notar que el volumen se refiere al espacio calentado por la energía calórica producida durante el deslizamiento, el cual dependerá de la difusividad térmica del material y consecuentemente del tiempo. Si se considera el volumen de material que se funde como variable dependiente del tiempo, se deduce que la magnitud de deslizamiento requerida para la fusión es inversamente proporcional a la velocidad de deslizamiento. Una aproximación ilustrativa se obtiene si consideramos el volumen fundido como un cuerpo tabular de área unitaria paralelo al plano de falla que crecerá en función del tiempo de acuerdo con  $y = \sqrt{\kappa t}$ , donde  $y$  es la distancia perpendicular al plano,  $t$  el tiempo transcurrido desde el inicio del calentamiento y  $\kappa$  la difusividad del material (Turcotte y Shubert, 1982; p. 154). Considerando que el volumen es igual a

$\sqrt{\kappa t}$  multiplicado por el área unitaria, y utilizando la ecuación (4), tenemos:  $d = \frac{\rho C \kappa^{1/2} t^{1/2} (\Delta T)}{\tau}$ ; eliminando las raíces cuadradas

das  $\frac{d^2}{\kappa t} = \left( \frac{\rho C (\Delta T)}{\tau} \right)^2$ , y obtenemos:

$$d = \frac{\kappa}{v} \left( \frac{\rho C (\Delta T)}{\tau} \right)^2 \quad (5)$$

De acuerdo con esta ecuación, la velocidad de deslizamiento se convierte en un parámetro crítico; considérese que para velocidades grandes, el volumen permanecerá pequeño para un tiempo pequeño y se requerirá una  $d$  pequeña de acuerdo con (5). A mayor velocidad se requerirá una distancia de deslizamiento  $d$  menor, produciéndose volúmenes pequeños de fundido, lo cual es una característica típica de las pseudotaquilitas asociadas con fallas.

Sustituyendo el volumen por  $\sqrt{\kappa t}$  en (3), se tiene que la temperatura en función del tiempo y la velocidad será

$$T = \frac{\tau}{\rho C \sqrt{\kappa}} v t^{1/2} \quad (6)$$

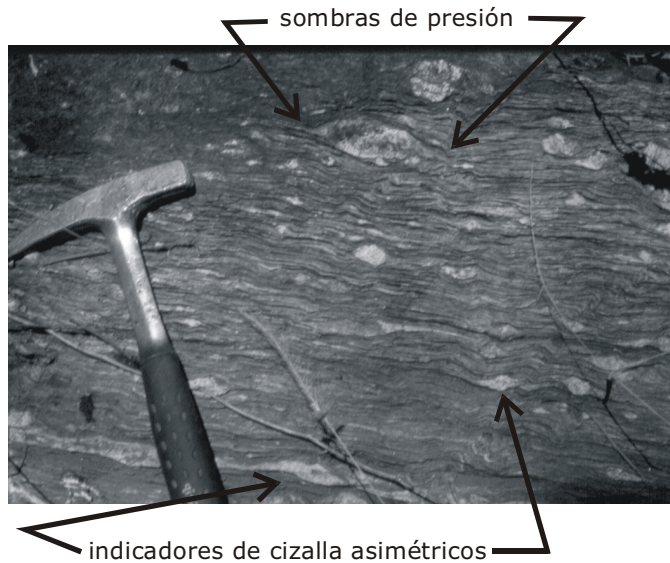
Nótese que  $T \propto v$  para un tiempo determinado y  $\propto t^{1/2}$  para una velocidad constante, de donde se deduce que la velocidad de deslizamiento ejercerá un control fundamental en la elevación de la temperatura del material. Típicamente se considera que velocidades cercanas o superiores a 1 m/s son necesarias para producir pseudotaquilitas.



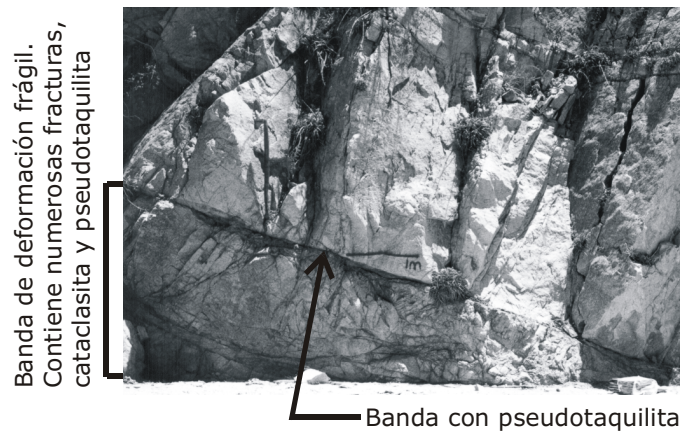
## CARACTERÍSTICAS TEXTURALES

Las características texturales que delatan la presencia de pseudotaquilita son aquellas que podemos asociar al proceso descrito de fusión por fricción debido al deslizamiento de una falla. Algunas características son indicativas de su presencia, o pueden sugerir un medio adecuado para su formación (deformación frágil). Algunas otras son excluyentes de otras fases, las cuales pueden ser cataclasitas o milonitas.

Con el fin de especificar las diferencias entre las milonitas y las pseudotaquilitas que permiten diferenciar esas rocas en muestra de mano y bajo el microscopio, debemos primero considerar los mecanismos que las originan. Las milonitas son rocas formadas por procesos de deformación cristaloplástica. En términos generales, esa deformación está controlada por la temperatura y ocurre a velocidades muy bajas; varios órdenes de magnitud menor que las velocidades de deslizamiento sobre planos de falla. Típicamente, aunque no exclusivamente, las milonitas se presentan en bandas o cuerpos gruesos en los que se puede observar graduación en la magnitud de la cizalla. Los listones de cuarzo u otro mineral y la formación de subgranos, sombras de presión cerca de los cristales mayores e indicadores de cizalla asimétricos, son algunas de las características más típicas de la presencia de milonitas (Figura 2). En escala de afloramiento, a diferencia de las milonitas, las pseudotaquilitas presentan límites discretos (Figuras 3 y 4); pasan de manera abrupta de una roca no deformada a bandas delgadas de roca muy deformada. Típicamente se asocian con un gran número de fracturas y con la presencia de cataclasitas (Figura 3). Estas características las hacen fácilmente distinguibles de milonitas de grados bajos a intermedios, pero podrían llegar a confundirse con bandas de ultramilonita; de ésta se distingue porque comúnmente contienen cristales redon-



**Figura 2.** Fotografía que muestra un aspecto de las milonitas que afloran en la región de Oaxaca, Oaxaca. Obsérvese el bandeamiento ondulante y la presencia de numerosos clastos con sombras de presión.

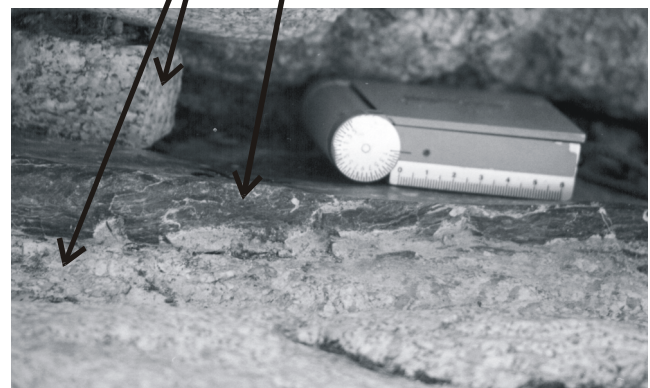


**Figura 3.** Fotografía que muestra el afloramiento de una falla asociada a la falla de los Planes. La estructura muestra una zona de deformación intensa con más de 2m de ancho dentro de la que hay un intenso fracturamiento y donde se identificaron bandas de cataclasita y pseudotaquilita. Nótese lo discreto de su pared de techo y que el bloque del alto está mucho menos deformado.

a



Granito sin deformar      Banda de pseudotaquilita



b

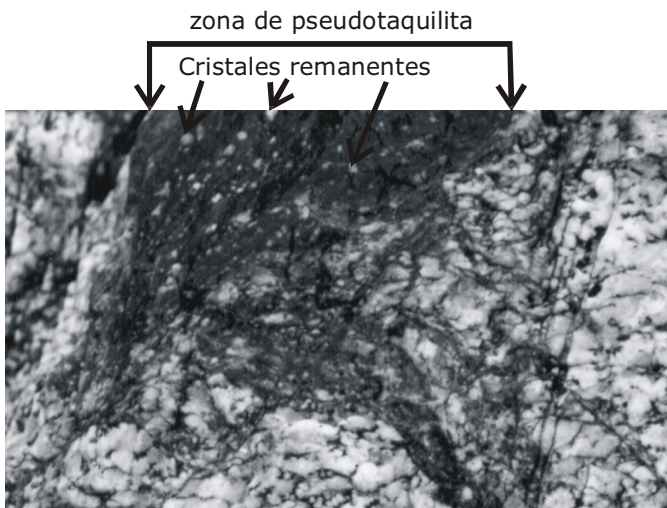
**Figura 4.** Fotografías que muestran uno de los planos principales con pseudotaquilita del arroyo El Ancón. Nótese que el paso de la zona deformada a la no deformada es discreto y la banda de roca de falla mide sólo unos centímetros de ancho.



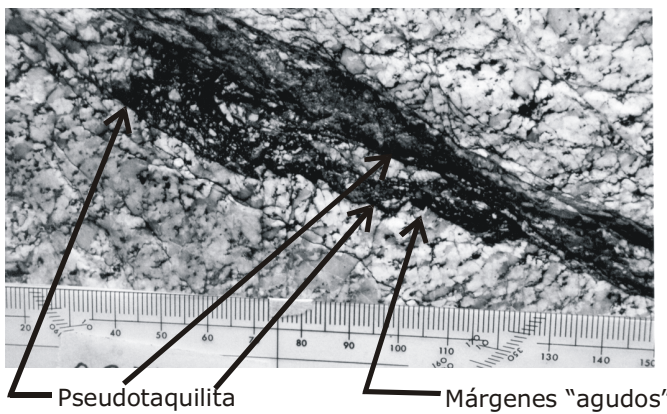
deados, sin sombras de presión, inmersos en el material afanítico (Figura 5). Estas características pueden ser perceptibles tanto a escala mesoscópica como microscópica.

Es muy común que las pseudotaquilas aparezcan como material inyectado en fracturas, aunque también se presentan así las cataclasitas. Con mucha frecuencia ambas fases aparecen juntas, rellenando fracturas lejos del lugar donde fueron formadas (Figura 6). Cuando se presenta una fase vítrea, llega a formar estructuras de inyección con geometrías que difícilmente podrían formarse en una fase no líquida (Figura 7). A nivel de muestra de mano las estructuras de inyección permiten diferenciarlas tanto de ultramilonitas como de cataclasitas.

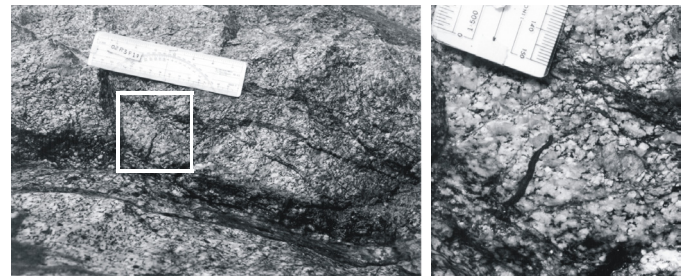
Al microscopio, es común encontrar en una sola muestra milonitas, cataclasitas y pseudotaquilas. Para identificar las pseudotaquilas es conveniente buscar material isotrópico con tex-



**Figura 5.** Acercamiento de una fractura con pseudotaquilita y cataclasita. Obsérvese que, a diferencia de la milonita mostrada en la Figura 2, los clastos no presentan sombras de presión y, a diferencia de la cataclasita mostrada en la Figura 6, los clastos se encuentran redondeados, lo que se interpreta como producto de la fusión.

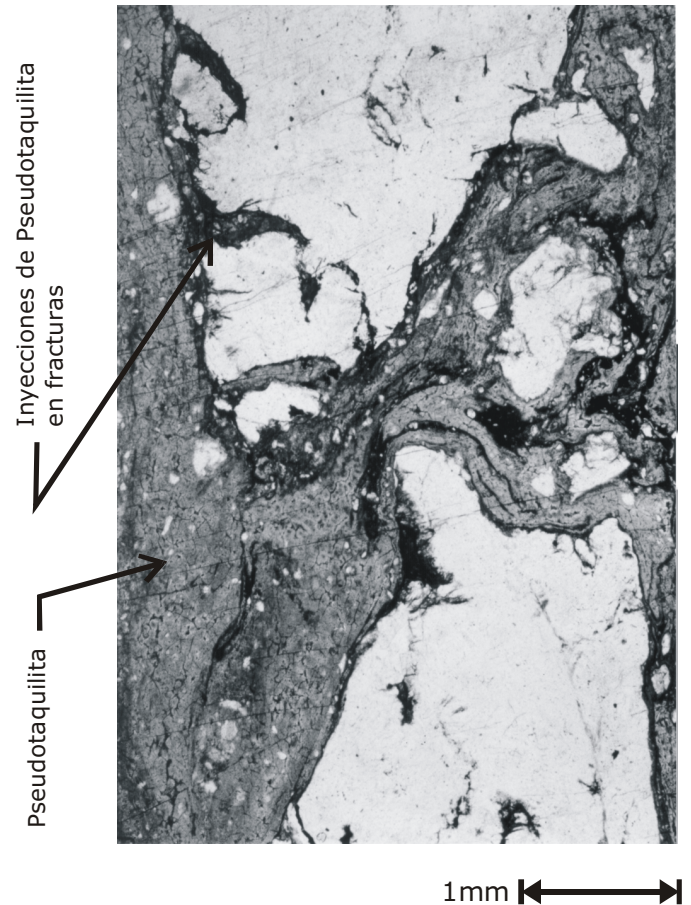


**Figura 6.** Fotografía que muestra una fractura "abierta" rellena de material de falla constituido por pseudotaquilita (bandas más oscuras) y cataclasita. Los márgenes aserrados con puntas agudas evidencian la ausencia de cizalla a lo largo de la fractura.



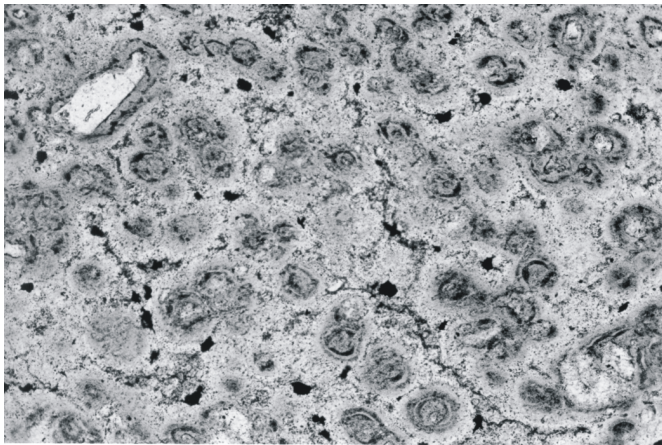
**Figura 7.** Fotografías que muestran una estructura de inyección de pseudotaquilita en forma de "gusano" emergiendo de una fractura donde se aprecia que hubo cizalla. Esta estructura evidencia una fase líquida, ya que difícilmente otro tipo de material podría producirla.

turas de flujo (Figura 8); textura esferulítica (Figura 9); material de texturas afaníticas o criptocristalinas con cristales remanentes redondeados y sin sombras de presión (Figura 10). Una característica interesante que encontramos en las pseudotaquilas del arroyo el Ancón, es la presencia de sistemas de fracturas tipo "placa de vidrio" en las vetas de pseudotaquilita. Este tipo de fracturas se forma en un medio isotrópico, por lo que no se presentan en las fases cristalinas (Figura 11).

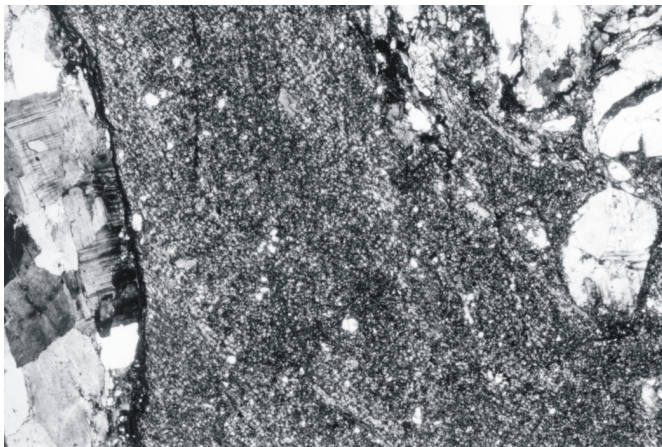


**Figura 8.** Fotomicrografía con luz plana donde se muestra un flujo de pseudotaquilita. La pseudotaquilita intruye en las fracturas del granito (zona clara) llegando a separar y asimilar fragmentos. Nótese que los cristales que flotan en la pseudotaquilita están redondeados.





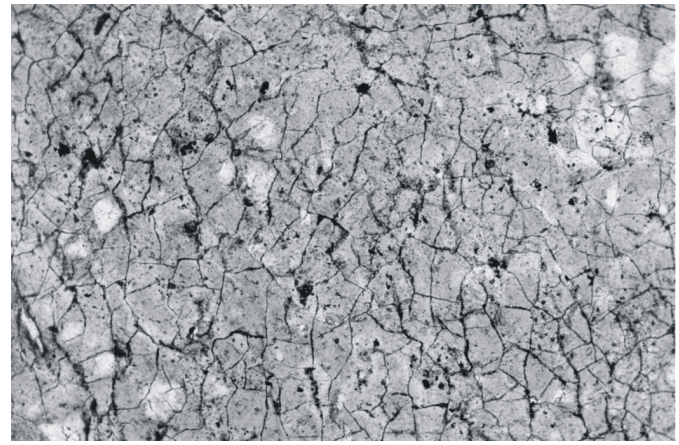
**Figura 9.** Fotomicrografía con luz plana de pseudotaquilita esferulítica que rellena una fractura. Las esferulitas son estructuras de recrystalización que evidencian la naturaleza vítrea del material.



**Figura 10.** Fotomicrografía con luz polarizada de una veta rellena de pseudotaquilita que se observa como material criptocristalino con pequeños clastos (en su mayoría cristales) redondeados.

## PERSPECTIVAS DE NUESTRA INVESTIGACIÓN

En los últimos años han surgido ideas novedosas para el estudio de las pseudotaquilitas asociadas con fallas. Por ejemplo, aún hasta ahora subsiste el problema de identificar cuándo el material que se observa en el microscopio óptico como una pasta afanítica, representa las fases vítreas (pseudotaquilita) producidas por fricción y no ultracataclasita. Esto se complica con la presencia de fenómenos de recrystalización o alteración. Se ha propuesto que es posible determinar los casos en que ocurrió fusión estudiando la redondez de los clastos contenidos en la matriz (Lin, 1999). En nuestro caso aún no hemos realizado este tipo de estudio, pero nos permitirá identificar la cantidad de pseudotaquilita relativa a la



**Figura 11.** Fotomicrografía con luz plana mostrando un detalle de una veta de pseudotaquilita que desarrolla fracturas tipo "placa de vidrio".

cataclasita. Ha sido propuesto también que se puede determinar la distancia de deslizamiento en la cual se logra el debilitamiento de una falla durante un evento sísmico, ya que la resistencia friccional varía en el tiempo (Hirose y Shimamoto, en prensa). Se ha planteado también que es posible determinar la temperatura (y profundidad) a la que se formaron las pseudotaquilitas (Hirose y Shimamoto, en prensa) con base en la medición de las cantidades relativas de clastos y matriz. Estas técnicas no las hemos aplicado aún a nuestras rocas, pero pretendemos hacerlo como parte de la investigación que estamos desarrollando.

Un aspecto que nos interesa especialmente es la relación que existe entre el volumen de pseudotaquilita que puede producir una falla y la velocidad de deslizamiento necesaria. Hemos observado fracturas muy pequeñas en nuestras muestras, menores de 10 cm de longitud que están rellenas de material oscuro, el cual suponemos que es pseudotaquilita. Si confirmamos que se trata de una fase vítrea, entonces se plantea la interrogante siguiente: ¿qué velocidades de deslizamiento requerimos para fundir la roca con distancias de deslizamiento de unos milímetros o aún menores? Al parecer, se requieren velocidades varios órdenes de magnitud superiores a los deslizamientos sobre fallas sísmicas, lo que nos plantea el problema de buscar una causa capaz de inducir esas velocidades de deslizamiento en el ambiente de una falla normal. Por otro lado, ¿podría tratarse de pseudotaquilitas formadas por presión y no por fricción, implicando la presencia en fallas de ambos tipos de pseudotaquilitas? y si así fuera ¿qué fenómeno puede proveer las presiones necesarias en un ambiente de falla normal? Estas son las interrogantes principales que abordamos en nuestro proyecto de investigación que, en este momento, se encuentra aún en sus fases iniciales. Quizá con un poco de suerte logremos dar alguna respuesta...

## REFERENCIAS

- Hirose, T., Shimamoto, T., 2003 (en prensa). Fractal dimension of molten surfaces as possible parameter to infer the slip-weakening distance of faults from natural pseudotachylites: *Journal of Structural Geology*.
- Kenkmann, T., Hornemann, U., and Stöffler, D., 2000. Experimental generation of shock-induced pseudotachylites along lithological interfaces: *Meteoritics & Planetary Sciences*, 35, 1275-1290.
- Lin, A., 1999. Roundness of clasts in pseudotachylites and cataclastic rocks as an indicator of frictional melting: *Journal of Structural Geology*, 21, 473-478.
- Melosh, H.J., 2003. The mechanics of pseudotachylite formation in impact events. <http://www.lpl.arizona.edu/~jmelosh/Pseudotachylites.pdf>
- O'Hara, K.D., 2001. A pseudotachylite geothermometer: *Journal of Structural Geology*, 23, 1345-1357.
- Puy-Alquiza, María de Jesús, 1992. Caracterización geológico-estructural del sistema de fallas San Juan de Los Planes y su relación con las unidades litológicas adyacentes, Baja California Sur, México. Tesis de licenciatura de Geología, UABCS, (inédita).
- Ramos Velásquez, Ernesto, 1998. Características de la deformación en las rocas cristalinas cretácicas de la región de E-SE de la Ciudad de La Paz, B.C.S., México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Geología. Tesis de Maestría (inédita), 122pp.
- Tolson, G., 1998. Deformación, exhumación y geotectónica de la margen continental de Oaxaca: datos estructurales, petrológicos y geotermobarométricos: Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Geofísica, Tesis Doctoral (inédita), 98 p.
- Turcotte, D.L., y Schubert, G., 1982. *Geodynamics, applications of continuum physics to geological problems*, John Wiley & Sons, 450 pp.

Recepción del manuscrito: 20 de septiembre, 2003

Recepción del manuscrito coregido: 16 de febrero, 2004

Aceptación del manuscrito: 18 de febrero, 2004