

# ANÁLISIS DE LA MICROSISMICIDAD ASOCIADA A LAS FALLAS DE TAMBOMACHAY Y QORICOCHA, CUSCO

Patricia Guardia y Hernando Tavera

Dirección de Sismología/Instituto Geofísico del Perú; Pguardia@igp.gob.pe; hjtavera@geo.igp.gob.pe

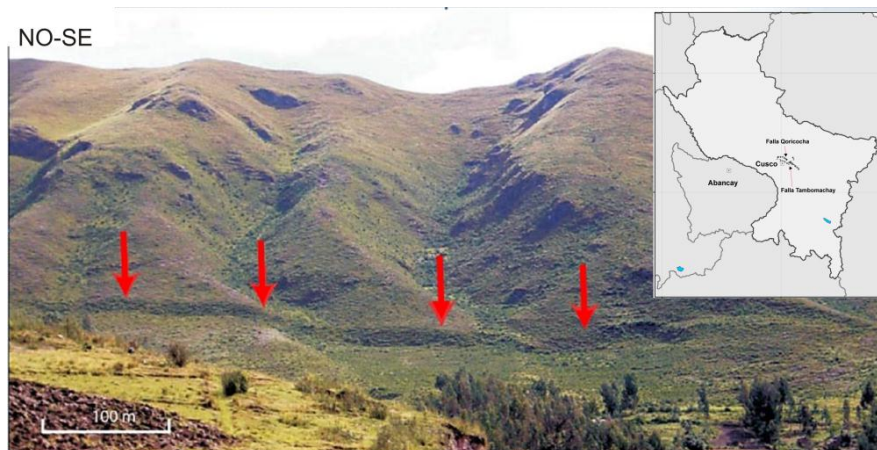
## RESUMEN

Se analiza la distribución espacial de la sismicidad asociada a las fallas de Tambomachay y Qoricocha registra durante un periodo de 12 meses haciendo uso de una red sísmica local compuesta por siete estaciones de banda ancha. Durante este periodo se registró 152 microsismos cuyos parámetros hipocentrales fueron calculados evaluando 6 modelos de velocidad. La distribución espacial de la microsismicidad asociada a las fallas de Tambomachay y Qoricocha, consta de 64 eventos, con magnitudes  $M_l < 2.0$  y profundidad menor a 10 km. En profundidad la actividad microsísmica sugiere que las fallas de Tambomachay y Qoricocha buzanan en dirección SO con ángulos próximos a  $50^\circ$ , correspondiendo a procesos de deformación por extensión.

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de los andes peruanos se observa la presencia de fallas geológicas que evidencian la continua deformación de la cordillera como resultado del proceso de convergencia de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. El sistema de fallas de la región del Cusco es parte de este proceso, siendo de las más importantes en América. Este sistema considera a las fallas de Tambomachay, Qoricocha, Chincheros, Tamboray, Zurite, entre otras. Las fallas cercanas a la ciudad del Cusco son las de Tambomachay y Qoricocha; por lo tanto, representan ser un constante peligro para esta ciudad.

La falla de Tambomachay (Sebrier et al., 1982) se localiza a 4 km al norte del Cusco, tiene una orientación E-O, pero hacia el este cambia a rumbo NO-SE. Como resultado de su evolución, durante el Cenozoico experimentó movimientos inversos y de rumbo que definieron su traza en superficie. Durante el cuaternario se han formado escarpas de 400 metros que indican movimientos normales con inclinaciones al SE y con buzamientos que varían entre  $60^\circ$ - $70^\circ$  al sur. Las escarpas de la falla pueden ser vistas sobre 18 km de longitud, presentan alturas de 2 m y en el nivel local llegan hasta los 4 metros (Figura 1). Asimismo, la falla Qoricocha se encuentra a 7 km al norte de la falla de Tambomachay y presenta algunas escarpas de falla sobre una longitud de 3 km. Las escarpas buzanan en dirección SO y siguen una orientación  $N100^\circ E$ . Según Cabrera et al (1987), el análisis microtectónico muestra evidencias de recientes movimientos por extensión. En dirección Oeste, la falla corta morrenas recientes y por su morfología es de fácil observación. En el extremo noreste del lago Qoricocha, la falla presenta una escarpa de 1.5 km que corta flujos volcánicos del Plio-Cuaternario.



**Figura 1** Vista panorámica de la falla Tambomachay. Las flechas indican la traza de la falla. (Audin, 2008).

La sismicidad histórica de la región del Cusco es mínima debido principalmente a la falta de información sobre la posible ocurrencia de sismos en el pasado. Según Silgado (1978), los únicos sismos que afectaron a la ciudad del Cusco y para los cuales existe alguna referencia, son los de 1650 con una magnitud estimada de 7.2 (Imax, X MM) y el de 1950 con magnitud 6.0 (Imax, VIII). Ambos sismos produjeron importantes daños y destrucción en la ciudad del Cusco y alrededores. Aunque se desconoce la ubicación de sus epicentros, por el nivel de los daños en la ciudad del Cusco se asume que fueron originados por la reactivación de la falla de Tambomachay.

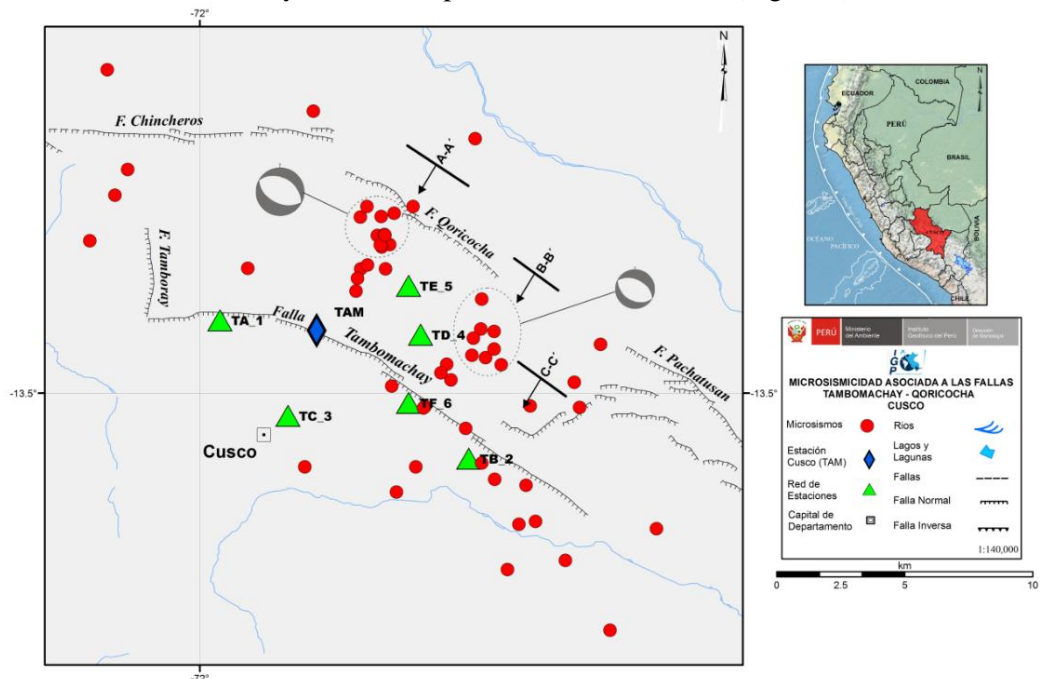
En los últimos 50 años, se tiene información sobre la ocurrencia de sismos con posible origen en la falla de Urcos (1965), en la falla de Chincheros (1986), este último, produjo intensidades de VII (MM) en la ciudad del Cusco ocasionando daños importantes en viviendas de adobe, además de deslizamientos locales. Otros de menor magnitud, pero que han producido intensidades del orden de IV-V (MM), ocurrieron en los años 1995 (Pillpinto-Acos), 1996 (Anta-Cusco), 1998 (Quillabamba), 1999 (Cusco) y durante el año 2003 (Lucre, Acomayo y Capacmarca). A la fecha no existe evidencia de sismos con origen en las fallas de Tambomachay y Qoricocha.

En la actualidad, la sismicidad instrumental en la región del Cusco no es muy frecuente, pero ocurren sismos con magnitudes del orden de 4.0 ML entorno de la localidad de Andahuaylillas (al sur de la ciudad del Cusco) que son percibidos en la ciudad del Cusco.

En este estudio, se pretende conocer la geometría y patrón de deformación de las fallas de Tambomachay y Qoricocha utilizando información sísmica obtenida de una red sísmica local que operó en torno a la misma durante un año.

### ANÁLISIS DE LA MICROSISMICIDAD

Durante el periodo de tiempo de un año, se mantuvo operativa una red sísmica local compuesta por 7 estaciones de banda ancha entorno a la falla Tambomachay (nov-2011 a nov-2012). El análisis de la información ha permitido identificar el registro de 152 eventos microsísmicos y de ellos, solo 64 presentaron sus hipocentros entorno a las fallas de Qoricocha y Tambomachay. Estos eventos presentan magnitudes menores a 2.0 ML y focos hasta profundidades de 10 km (Figura 2).



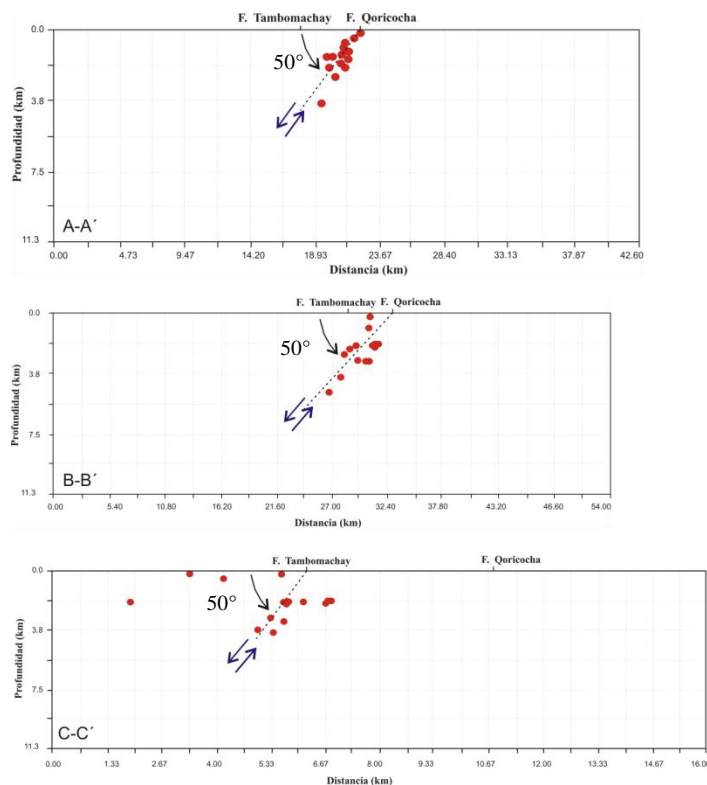
**Figura 2.** Actividad microsísmica asociada a las fallas de Tambomachay y Qoricocha

En la Figura 2 se observa agrupamientos de epicentros en el extremo SO de la falla Qoricocha, otro al sur sobre un área sin evidencia de traza de falla alguna y otros epicentros más dispersos en el extremo SO de la falla Tambomachay, lo cual evidencian que ambas fallas desarrollan procesos de

deformación muy lenta. En el caso del segundo agrupamiento de microsismicidad, esta podría sugerir en dicha área se podría producir un sismo que muestre en superficie una escarpa de falla que permita unir a las fallas Qoricocha y Pachatusan.

Para analizar la distribución de la microsismicidad en profundidad, se han trazado tres perfiles perpendiculares a las trazas de las fallas de Tambomachay y Qoricocha, de acuerdo a la Figura 2. Los resultados se presentan en la Figura 3 y en ella se observa que en el perfil A-A', correspondiente a la falla Qoricocha, la microsismicidad se distribuye en profundidad siguiendo un plano que sugiere que la traza de la falla alcanza profundidades de 10 km con una inclinación del orden de  $50^\circ$  en dirección SO. Similar situación se presenta en el perfil B-B', confirmando que un futuro sismo formaría una traza de falla con la misma geometría que la falla Qoricocha. El perfil C-C' muestra focos sísmicos dispersos en profundidad, pero sugiere que la traza de la falla Tambomachay podría presentar una inclinación del orden de  $50^\circ$  en dirección SO, aunque se requiere de mayor información para definir su geometría en profundidad.

Considerando que el número de estaciones sísmicas utilizadas en el monitoreo sísmico no fue numeroso, se ha visto por conveniente realizar mecanismos focales compuestos utilizando como información las polaridades de las ondas P (Figura 2). Para los agrupamientos de sismos asociados a la falla Qoricocha, los mecanismos focales sugieren procesos de deformación por extensión con planos nodales orientados en dirección NO-SE, siendo el plano nodal asociado a la falla de Qoricocha el que presenta un ángulo de buzamiento de  $48^\circ$ - $54^\circ$  grados, lo cual sugiere procesos de deformación en dirección NE-SO. Estos resultados son coherentes con lo observado en los perfiles de sismicidad. Para la falla Tambomachay no fue posible construir mecanismo por no contar con suficiente información.



**Figura 3** Perfiles sísmicos en profundidad de acuerdo a la Figura 2.

## CONCLUSIONES

- El análisis de la microsismicidad asociada a las fallas de Tambomachay y Qoricocha, han permitido llegar a las siguientes conclusiones:
- Ambas fallas generan actividad microsísmica con eventos con magnitudes menores a 2.0 ML y profundidades de hasta 10 km.

- La microsismicidad asociada a la falla Qoricocaha sugiere que su plano de falla buza en dirección SO con un ángulo de  $\sim 50^\circ$
- Se ha registrado actividad microsísmica en un área libre de trazas de falla, pero su distribución en profundidad y mecanismo focal, sugiere el desarrollo de procesos de deformación similar al de la falla Qoricocha. Esta microsismicidad indicaría que un nuevo evento sísmico generaría en superficie una traza de falla que uniría a las fallas Qoricocha y Pachatusan.
- No se ha registrado microsismicidad representativa de la falla Tambochay, pero es posible que su plano de falla este buzando en dirección SO con un ángulo de  $\sim 50^\circ$ .

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Cabrera, J., Sebrier, M. y Mercier, J. (1987). Active normal faulting in high plateaus of Central Andes: the Cusco region (Peru). *Annales Tectonicae*, 2, 116-138.
2. Dorbath, C., Dorbath, L., Cisternas, A., Deverchere, J., Diament, M., Ocola, L., and Morales, M., (1986). On crustal seismicity of the amazonian foothill of the central peruvian Andes. *Geophysical Research Letters* 13, 1023-1026.
3. Sébrier, M., Huamán, D.; Blanc, J.L., Macharé, J. Bonnot, D. y Cabrera, J. (1982) - Observaciones acerca de la neotectónica del Perú. Lima: Instituto Geofísico del Perú, 107 p.
4. Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). Instituto de Geología y Minería, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ing. Geológica, 3, 130p.
5. Macharé, J.; Benavente, C. & Audin, L., (2009) - Síntesis descriptiva del mapa neotectónico 2008. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 40, 103p.

# Análisis de la microsismicidad asociada a las Fallas de Tambomachay y Qoricocha

Cusco

Patricia Guardia y Hernando Tavera

Instituto Geofísico del Perú



## Resumen

Se analiza la distribución espacial de la sismicidad asociada a las fallas de Tambomachay y Qoricocha registrada durante un periodo de 12 meses haciendo uso de una red sísmica local compuesta por siete estaciones de banda ancha. Durante este periodo se registró 152 microsismos cuyos parámetros hipocentrales fueron calculados evaluando 6 modelos de velocidad. La distribución espacial de la microsismicidad asociada a las fallas de Tambomachay y Qoricocha, consta de 64 eventos, con magnitudes  $M_L = 2.0$  y profundidad menor a 10 km. En profundidad la actividad microsísmica sugiere que las fallas de Tambomachay y Qoricocha buzcan en dirección SO con ángulos próximos a  $50^\circ$ , correspondiendo a procesos de deformación por extensión.

## Introducción

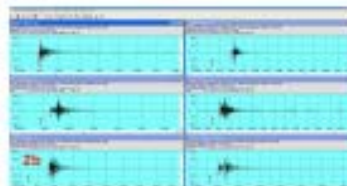
A lo largo de los andes peruanos se observa la presencia de fallas geológicas que evidencian la continua deformación de la cordillera como resultado del proceso de convergencia de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. La falla de Tambomachay (Sébrier et al., 1982) se localiza a 4 km al norte del Cusco, tiene una orientación E-O, pero hacia el este cambia a rumbo NO-SE. Como resultado de su evolución, durante el Cenozoico experimentó movimientos inversos y de rumbo que definieron su traza en superficie. Durante el cuaternario se han formado escarpes de 400 metros que indican movimientos normales con inclinaciones al SE y con buzamientos que varían entre  $60^\circ$ - $70^\circ$  al sur. Las escarpes de la falla pueden ser vistos sobre 18 km de longitud, presentan alturas de 2 m y en el nivel local llegan hasta los 4 metros (Figura 1). Asimismo, la falla Qoricocha se encuentra a 7 km al norte de la falla de Tambomachay y presenta algunas escarpes de falla sobre una longitud de 3 km. Las escarpes buzcan en dirección SO y siguen una orientación  $N100^\circ E$ . Según Cabrera et al. (1987), el análisis microtectónico muestra evidencias de recientes movimientos por extensión. En dirección Oeste, la falla corta morrenas recientes y por su morfología es de fácil observación. En el extremo noreste del lago Qoricocha, la falla presenta una escarpa de 1.5 km que corta flujos volcánicos del Plio-Cuaternario.



Figura 1. Observación de las Fallas de Tambomachay y Qoricocha en el nivel local.

## Análisis de la Microsismicidad

Durante el periodo de tiempo de un año, se mantuvo operativa una red sísmica local compuesta por 7 estaciones de banda ancha entorno (Figura 2a) a la falla Tambomachay (nov-2011 a nov-2012). El análisis de la información ha permitido identificar el registro de 152 eventos microsísmicos y de ellos, solo 64 presentaron sus hipocentros entorno a las fallas de Qoricocha y Tambomachay (Figura 2b). Cada uno de estos eventos han sido analizados con 6 m modelos de velocidad, quedando con el modelo propuesto por Dorbath, 1996, (Figura 2c). Para corregir la velocidad de las ondas S se ha elaborado la curva de Wadati con un total de 210 eventos de onda P y S provenientes de 30 microsismos, se ha obtenido un valor para  $V_p/V_s$  de 1.66 (Figura 2d). Estos eventos presentan magnitudes menores a 2.0  $M_L$  y focos hasta profundidades de 10 km (Figura 3). En la Figura 3 se observa agrupamientos de epicentros en el extremo SO de la falla Qoricocha, otro al sur sobre un área sin evidencia de traza de falla alguna y otros epicentros más dispersos en el extremo SO de la falla Tambomachay, lo cual evidencian que ambas fallas desarrollan procesos de deformación muy lenta. En el caso del segundo agrupamiento de microsismicidad, esta podría sugerir en dicha área se podría producir un sismo que



Espesor (km)	$V_p$ (km/seg.)
0	5.8
15	6.2
30	6.8
50	8.0

a) Dorbath

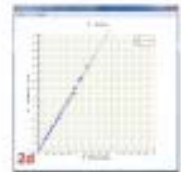
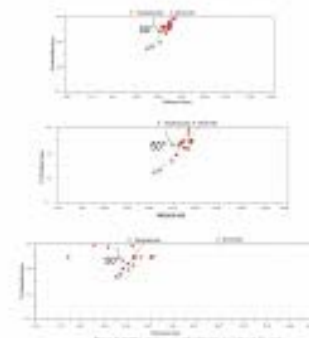
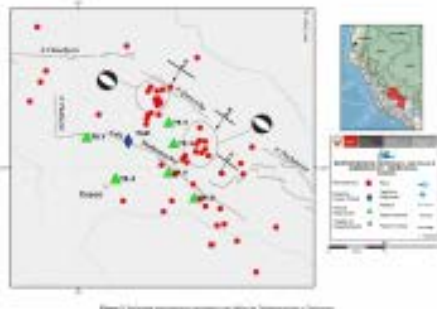


Figura 2. Análisis de la microsismicidad asociada a las fallas de Tambomachay y Qoricocha. a) Ubicación de las estaciones de banda ancha. b) Ejemplo de registros de ondas P y S. c) Modelo de velocidad de ondas P y S. d) Curva de Wadati para la microsismicidad asociada a las fallas de Tambomachay y Qoricocha.

Para analizar la distribución de la microsismicidad en profundidad, se han trazado tres perfiles perpendiculares a las trazas de las fallas de Tambomachay y Qoricocha, de acuerdo a la Figura 3. Los resultados se presentan en la Figura 4 y en ella se observa que en el perfil A-A', correspondiente a la falla Qoricocha, la microsismicidad se distribuye en profundidad siguiendo un plano que sugiere que la traza de la falla alcanza profundidades de 10 km con una inclinación del orden de  $50^\circ$  en dirección SO. Similar situación se presenta en el perfil B-B', confirmando que un futuro sismo formaría una traza de falla con la misma geometría que la falla Qoricocha. El perfil C-C' muestra focos sísmicos dispersos en profundidad, pero sugiere que la traza de la falla Tambomachay podría presentar una inclinación del orden de  $50^\circ$  en dirección SO, aunque se requiere de mayor información para definir su geometría en profundidad.

Considerando que el número de estaciones sísmicas utilizadas en el monitoreo sísmico no fue numeroso, se ha visto por conveniente realizar mecanismos focales compuestos utilizando como información las polaridades de las ondas P (Figura 2). Para los agrupamientos de sismos asociados a la falla Qoricocha, los mecanismos focales sugieren procesos de deformación por extensión con planos nodales orientados en dirección NO-SE, siendo el plano nodal asociado a la falla de Qoricocha el que presenta un ángulo de buzamiento de  $48^\circ$ - $54^\circ$  grados, lo cual sugiere procesos de deformación en dirección NE-SO. Estos resultados son coherentes con lo observado en los perfiles de sismicidad. Para la falla Tambomachay no fue posible construir mecanismos por no contar con suficiente información.



## Conclusiones

El análisis de la microsismicidad asociada a las fallas de Tambomachay y Qoricocha, han permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- Ambas fallas generan actividad microsísmica con eventos con magnitudes menores a 2.0  $M_L$  y profundidades de hasta 10 km.
- La microsismicidad asociada a la falla Qoricocha sugiere que su plano de falla buzca en dirección SO con un ángulo de  $50^\circ$ .
- Se ha registrado actividad microsísmica en un área libre de trazas de falla, pero su distribución en profundidad y mecanismo focal, sugiere el desarrollo de procesos de deformación similar al de la falla Qoricocha. Esta microsismicidad indicaría que un nuevo evento sísmico generaría una traza de falla que uniría a las fallas Qoricocha y Pachatusan.
- No se ha registrado microsismicidad representativa de la falla de Tambomachay, pero es posible que su plano de falla este buzando en dirección SO con un ángulo de  $50^\circ$ .

## Bibliografía

- Cabrera, J., Sábido, M. y Morales, J. (1987). Actividad sísmica y tectónica de la Cordillera de Cusco región Perú. *Anales Tectónicos*, 2, 115-138.
- Dorbath, C., Durrant, J., Deschamps, J., Desrochers, M., Cholet, J. and Morales, R. (1996). The tectonic evolution of the eastern peruvian Andes. *Geophysical Research Letters*, 23, 1325-1328.
- Galvez, M., Huaman, O., Bazo, J., Huachaca, J., Sarmiento, J. y Cabrera, J. (1982). Observaciones acerca de la tectónica del Perú. *Informe Instituto Geofísico del Perú*, 159 p.
- Sábido, E. (1971). Historia de las corrientes más importantes en el Perú (1812-1971). Instituto de Geología y Minería, Edición. Serie C. Desastres y Riesgos Geológicos, 3, 139p.