




CARACTERIZACIÓN MAGNETOTELÚRICA DE LAS FALLAS Y SISTEMA DE FALLAS EN EL VALLE DEL CUSCO, SUR DEL PERÚ

MAGNETOTELLURIC CHARACTERIZATION OF FAULTS AND FAULTS IN THE CUSCO VALLEY, SOUTHERN PERU

Yanet Antayhua¹  Briant García¹  Lorena Rossell¹ 
Carlos Benavente¹  Martyn Unsworth² 

¹Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico.

²Universidad de Alberta, Facultad de Ciencias.

Resumen

En este estudio, se presenta los resultados obtenidos de la investigación magnetotelúrica (MT) llevada a cabo en abril de 2018 en las principales fallas y sistemas de fallas identificados a lo largo del valle del Cusco, sur del Perú. El perfil magnetotelúrico tiende en dirección suroeste-noreste (SO-NE) y consiste de 14 sondeos MT, con espaciamentos de 500 a 700 m. En cada ubicación, se registraron datos de 10 a 24 horas, a fin de medir la resistividad del subsuelo a una profundidad aproximada de 6 km. Estos datos fueron convertidos en un modelo de resistividad eléctrica del subsuelo utilizando un algoritmo de inversión 2-D. El modelo de resistividad eléctrica fue interpretado sobre la base de los estudios geológicos y estructurales. Considerando que las zonas de fallas han mostrado respuestas conductivas en otros estudios, nosotros interpretamos que las zonas conductivas, identificadas en el modelo de resistividad eléctrica, sugieren una significativa correlación con las trazas de las fallas del valle del Cusco. Asimismo, se muestra por primera vez la geometría en profundidad (~6 km) de un sistema extensivo de fallas imbricadas que consisten en fallas normales y activas. Esto también nos invita a considerar a la falla Cusco como una estructura tectónica activa, que podría incrementar el peligro sísmico en el valle del Cusco.

Palabras clave: *Magnetotelúrica, Fallas activas, Zona conductiva, Zona resistiva, Peligro sísmico.*

Abstract

In this study we present the result of a magnetotelluric (MT) investigation carried out in April 2018 across the main faults and fault systems identified along the Cusco Valley, southern Peru. The profile trends southwest-northeast (SW-NE) and consist of 14 MT soundings with a spacing of 500-700 m. At each location data were recorded for 10 to 24 hours, in order to measure the subsurface resistivity to a depth of ~6 km. The data were converted into a model of subsurface electrical resistivity using 2-D inversion algorithm. This resistivity model was interpreted on the basis of geology and structural studies. Considering that fault zones have been showed relatively conductive responses in other studies, we interpret that the conductive zones identified in the electrical resistivity model suggest a significant correlation with traces of the active faults of the Cusco Valley. We also show, for the first time, the geometry in depth (~6 km) of an extensive system of interlocking faults consisting of several normal and active faults. It also invites us to consider the Cusco fault as an active tectonic structure, which could increase the seismic hazard in the Cusco Valley.

Keywords: *Magnetotelluric, Active Faults, Conductive zone, Resistive zone, Seismic Hazard.*

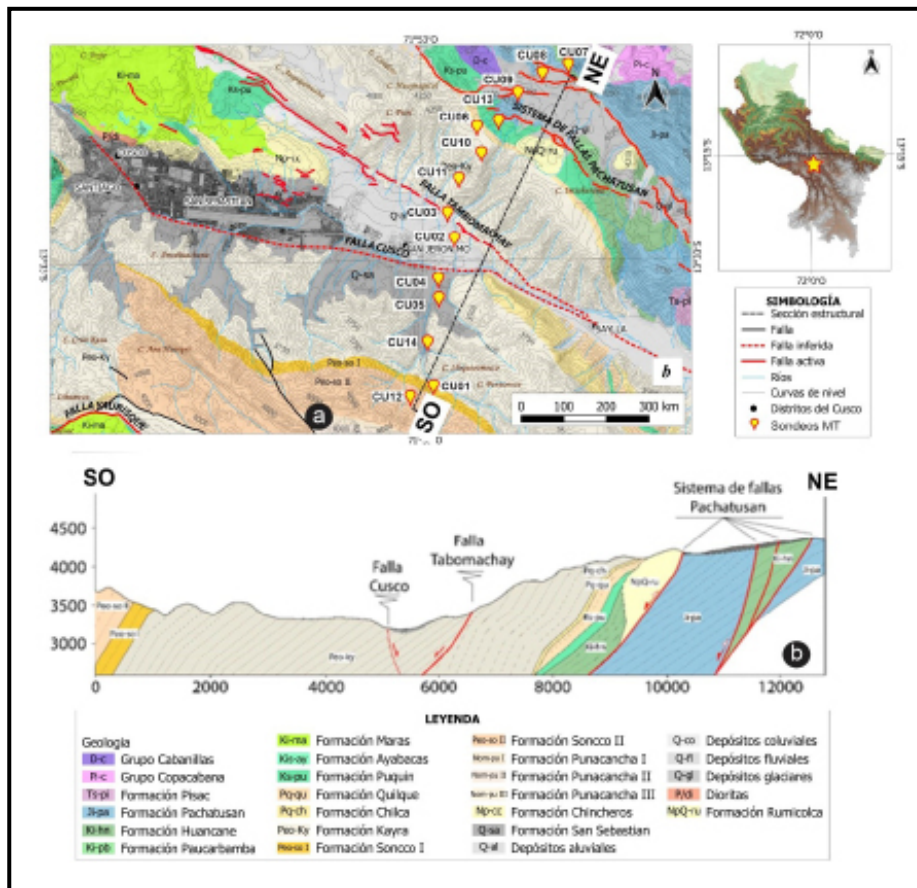
INTRODUCCIÓN

La ciudad del Cusco, en el valle del mismo nombre, se ubica en la parte central del departamento de Cusco, sur del Perú (71°58' O, 13°30' S), se constituye como una de las ciudades más vulnerables ante la ocurrencia de sismos de magnitud moderada ($M_w > 5.5$) como consecuencia de la activación y/o reactivación de fallas geológicas.

Los estudios previos de Sébrier et al. (1985), Cabrera et al. (1991) y los recientes de Carlotto et al. (2013), Benavente et al. (2013), Rosell et al. (2018) y Wimpenny et al. (2020) coinciden en señalar que en el valle del Cusco se emplazan las fallas Cusco, Tambomachay y el Sistema de Fallas Pachatusan (Figura 1).

Figura 1

- a) Mapa geológico del valle del Cusco con la ubicación de las fallas y sistema de fallas y del perfil magnetotelúrico en dirección suroeste-noreste (SO-NE).
- b) Sección estructural suroeste-noreste (SO-NE).



Según Sébrier et al. (1985), la Falla Tambomachay habría presentado movimientos de tipo inverso y de rumbo durante el Cenozoico; mientras que, en el Cuaternario cambió a tipo normal con buzamientos entre 60° y 70° hacia el sur.

Con relación a la Falla Cusco, la actividad tectónica cuaternaria fue evidenciada por Benavente et al. (2013) a través del análisis de los escarpes de la falla y la deformación de los sedimentos.

Los resultados mostraron dos tipos de deformaciones; la primera (en el sector sureste) de tipo compresiva, con dirección N128°E y con buzamiento promedio de 62° hacia el suroeste, la segunda (en el sector norte) de tipo normal. Mientras tanto, el Sistema de Fallas Pachatusan (SFP), ubicado al sureste de la ciudad de Cusco, está representado por segmentos estructurales discontinuos que, en total, tienen una longitud aproximada de 21 km; estos segmentos estructurales forman parte de las fallas cuaternarias activas ubicadas entre la cordillera Oriental y el Altiplano, son de tipo normal y buzanan al suroeste con ángulos que oscilan entre 50° y 70°.

De estas fallas y sistema de fallas del valle del Cusco, la Falla Tambomachay es considerada la más importante debido a que se ubica a tan sólo 4 km de la ciudad de Cusco, donde viven más de cuatrocientos mil habitantes, además, algunos segmentos de la FT han sido ocupados por la población. La ocurrencia de algún sismo de moderada magnitud en esta falla o cercana a ésta, podría causar pérdidas de vidas humanas y daños en la infraestructura, tal como habría sucedido con los sismos de 1650 ($M \sim 7.2$) y 1950 ($M \sim 6.0$) (Silgado, 1978). Estos sismos no serían los únicos puesto que, los estudios paleosismológicos (Benavente *et al.*, 2013), evidenciaron la ocurrencia de sismos de magnitud moderada en los años 1707 y 1943, con magnitudes mayores a 6.5 ($M > 6.5$) y profundidades menores a 30 km.

Asimismo, los estudios de microsismicidad (Guardia & Tavera, 2015) correspondiente al periodo noviembre 2011-noviembre 2012, demostraron que estas fallas están sísmicamente activas.

Aunque los estudios geológicos y estructurales de las fallas y sistema de fallas del valle del Cusco se intensificaron durante los últimos 10 años, éstos estuvieron enfocados al

conocimiento superficial y en menor grado a niveles profundos; en este contexto, en este estudio, se aplicó el método magnetotelúrico a fin de contribuir con el conocimiento de estas fallas en profundidad y correlacionarlos con los estudios geológicos, geofísicos y estructurales.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Adquisición de datos

El conjunto de datos utilizados en este estudio proviene de 14 sondeos magnetotelúricos (CU01-CU14) adquiridos entre el 9 y 18 de abril del año 2018, a lo largo del perfil longitudinal suroeste-noreste (SO-NE) (Figura 1) de aproximadamente 13 km que atraviesa, transversalmente, a las principales fallas y sistema de fallas activas del valle del Cusco.

Los datos fueron registrados con dos equipos magnetotelúricos MTU-5A 2000, adquiridos por INGEMMET en el año 2015.

Estos equipos constan de una antena GPS para sincronizar la hora de registro, tres bobinas de inducción y cinco electrodos porosos con sulfuro de cobre para medir, simultáneamente, tres campos magnéticos (H_x , H_y , H_z) y dos campos eléctricos (E_x , E_y) entre 10 y 24 horas continuas, en el rango de 0.003 s a 500 s.

Para asegurar la calidad de los registros, especialmente en la ciudad de Cusco donde es inherente el ruido industrial, se empleó la técnica de medición simultánea de dos sondeos MT, de tal modo que el registro de uno o del otro pudo ser utilizado como si fuese una estación de referencia (Smirnov *et al.*, 2008), logrando así reducir el ruido industrial propio de la ciudad del Cusco.

Procesamiento

El procesamiento inicial de los datos MT fueron realizados con los programas SSMT2000 y MT-Editor desarrollados por la empresa Phoenix Geophysics Ltd.

Estos programas permitieron visualizar los registros en series de tiempo, convertirlos a series de frecuencia para obtener las funciones de transferencia, y a partir de éstos se obtuvieron curvas de resistividad y fase (Figura 2a).

Posteriormente, este procesamiento fue optimizado con programas robustos desarrollados y modificados por Yu Tang de la

Universidad de Alberta (Canadá) y basados en la estimación robusta de la función de transferencia geomagnética de Egbert & Booker (1986).

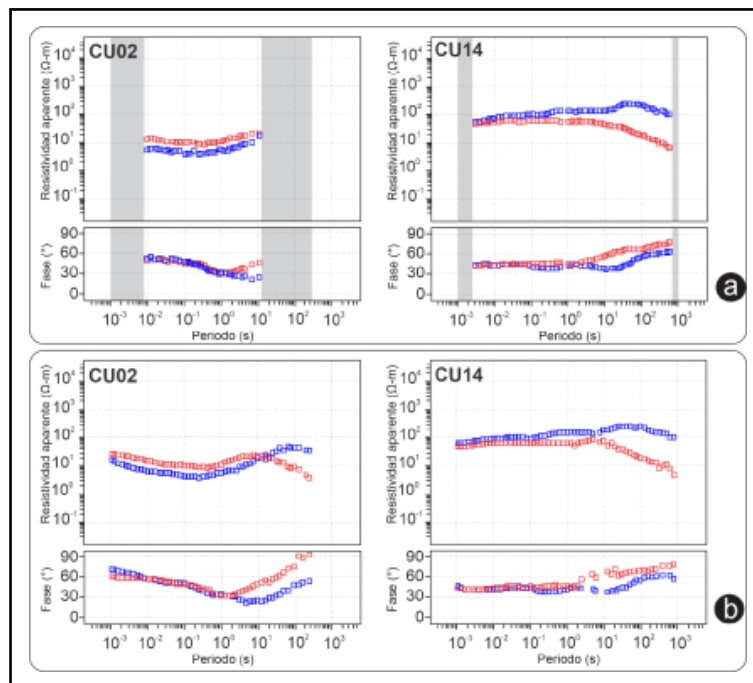
La aplicación del programa de Yu Tang permitió recuperar mayor información de las curvas de resistividad y fase en las altas y bajas frecuencias y, por tanto, ampliar la profundidad de exploración (Figura 2b).

Figura 2

Ejemplos del despliegue de las curvas de resistividad y fase de los sondeos magnetotéluricos CU02 y CU14.

a). Procesamiento de los sondeos CU02 y CU14 utilizando los programas robustos SSMT2000 de Phoenix Geophysics (lado izquierdo) y el método de Egbert (lado derecho) modificado por Yu Tang de la Universidad de Alberta (Canadá).

b). Procesamiento robusto donde se recupera información a periodos mayores a 10 s. Las curvas de color rojo y azul representan los modos transversal eléctrico (TE) y transversal magnético (TM) respectivamente.



Dimensionalidad y direccionalidad (strike)

A partir de los datos magnetotéluricos obtenidos en los 14 sondeos, se analizó la dimensionalidad y la direccionalidad (strike) de la estructura geoelectrica; para ello, se aplicó el método del tensor de fase de Caldwell et al. (2004).

Este método, además de brindar información de la dimensionalidad, también permite obtener información de la variación de la resistividad en profundidad.

Con relación a la dimensionalidad, el tensor de fase representado por un círculo sugiere una estructura geoelectrica de una dimensión (1-D) y si éstos están representados por elipses sugieren estructuras de dos dimensiones (2-D) y tres dimensiones (3-D).

Asimismo, la orientación preferencial del eje mayor o menor de la elipse permite delinear la direccionalidad (strike) de la estructura geoelectrica que, por lo general, son concordantes con la orientación de los sistemas de fallas principales de la zona de estudio.

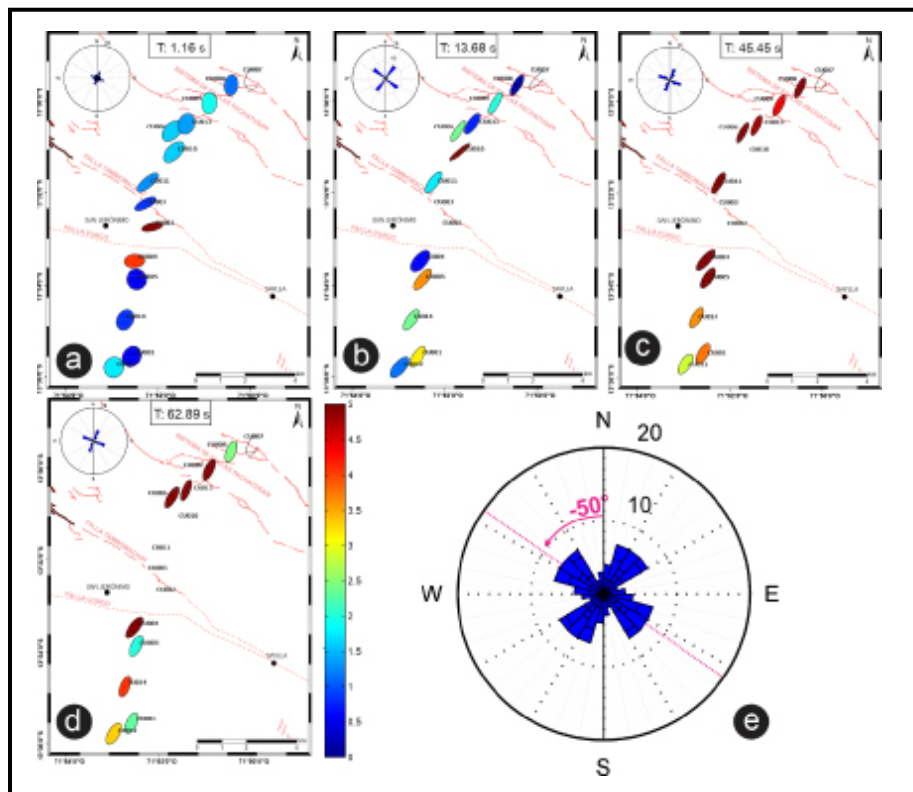
En la Figura 3, se presenta los diagramas del

tensor de fase para los periodos $T=1.16$ s (Figura 3a), $T=13.68$ s (Figura 3b), $T=45.45$ s (Figura 3c) y $T=62.89$ s (Figura 3d), a lo largo del perfil magnetotelúrico SO-NE.

Los resultados muestran formas de elipses con los semiejes mayores orientados en dirección SO-NE sugiriendo, a priori, que el comportamiento de la estructura geoelectrica en el valle del Cusco es 2-D, con direccionalidad (strike) de -50° en dirección NO (Figura 3e), consistente con la dirección preferencial de las fallas Cusco, Tambomachay y el Sistema de Fallas Pachatusan.

Figura 3

Estimación de la dimensionalidad y direccionalidad de la estructura geoelectrica utilizando el método de tensor de fase (Caldwell et al., 2004) para los periodos (T) de: a) $T=1.16$ s; b) $T=13.68$ s, $T=45.45$ s y c) $T=62.89$ s. La escala de colores representa a las estructuras conductivas (amarillo-rojo: >2.5) y resistivas (verde-azul: <2.5). Los diagramas de rosas representan las direcciones de la estructura geoelectrica para cada frecuencia. e) Promedio de la direccionalidad de la estructura geoelectrica regional.



Inversión magnetotelúrica (MT) 2-D

Con los resultados obtenidos del análisis de la dimensionalidad (2-D) y la dirección preferencial de la estructura geoelectrica (N50°O) se realizó la inversión magnetotelúrica conjunta 2-D de los modos transversos eléctrico (TE) y transversos magnético (TM), basados en los conceptos de gradientes conjugados no lineales (NLG) descritos por Rodi y Mackie (2001).

Después de 77 iteraciones, se seleccionó el modelo de resistividad mostrado en la Figura 4a.

Este modelo fue obtenido con una malla de 102 x 75 celdas con topografía, el porcentaje de error de 10%, el parámetro de regularización τ

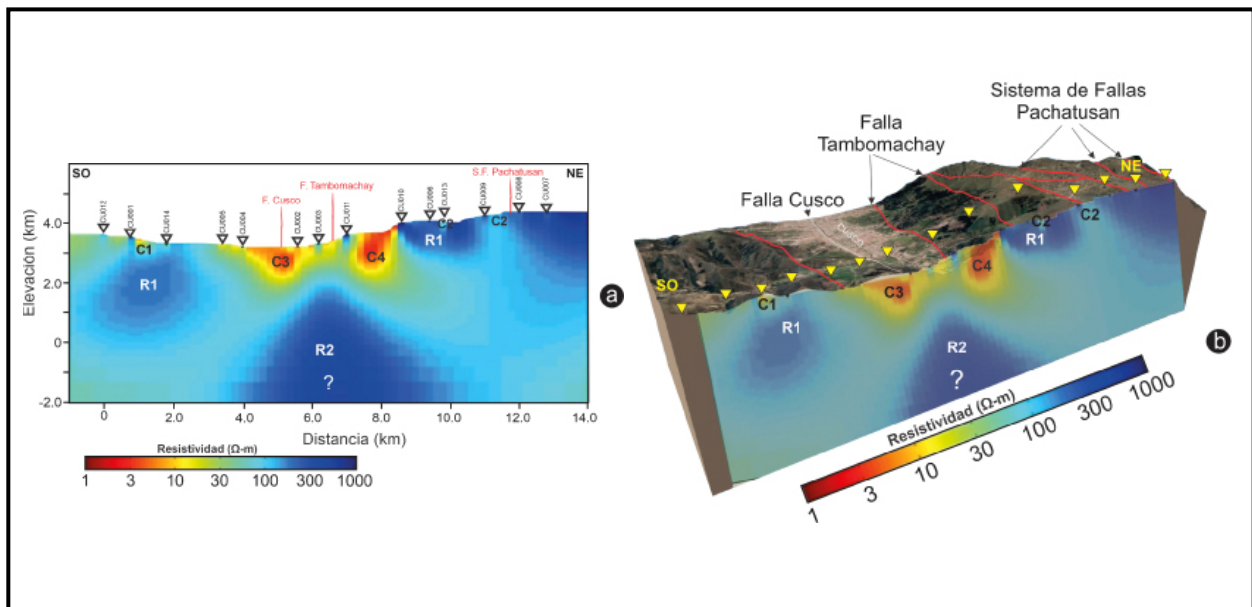
de 30 y la Raíz Media Cuadrática (RMS) de 2.9. En la Figura 4b se muestra la representación 3D del valle del Cusco, con la ubicación de las fallas Cusco y Tambomachay, el sistema de fallas Pachatusan, los sondeos magnetotelúricos (CU01-CU14) y la distribución de la resistividad en profundidad obtenida de la inversión magnetotelúrica.

En esta figura también se observa que la profundidad de exploración alcanzó 6 km aproximadamente.

En general, se identificaron cuatro zonas conductoras (C1-C4) y dos zonas resistivas (R1, R2).

Figura 4

a) Distribución de la resistividad obtenida de la inversión 2-D.
 b) Representación tridimensional del modelo magnetotelúrico del valle del Cusco en dirección SO-NE. Las líneas en color rojo representan a las fallas Cusco (FC), Tambomachay (FT) y el Sistema de Fallas Pachatusan (SFP). C1-C4: zonas conductoras R1 y R2: zonas resistivas.



Zonas conductivas

Las zonas conductivas C1 y C2, se caracterizan por presentar resistividades bajas de 10 a 70 Ω -m y se ubican en el extremo SO y NE del perfil.

Las zonas conductivas C3 y C4, ubicadas en la parte central del perfil, presentan resistividades menores a 7 Ω -m y alcanzan profundidades de 4 km. De manera particular, la zona conductiva C3 se asemeja a la geometría típica de una cuenca que se extiende hacia el suroeste hasta alcanzar profundidades de 6 km.

Zonas resistivas

Las zonas resistivas R1 se ubican al suroeste y noreste del perfil magnetotelúrico y alcanzan profundidades entre 5 y 2 km respectivamente.

La zona resistiva R2, a diferencia de R1, presenta resistividades altas entre 100 y 1000 Ω -m y se ubica por debajo de las zonas conductivas C3 y C4.

DISCUSIÓN

La aplicación del método magnetotelúrico en el estudio de fallas geológicas activas, ha incrementado considerablemente durante los últimos 20 años.

Por ejemplo, los estudios realizados por Triahadini (2019), Balasco et al. (2015), Pavez (2015), Unsworth & Bedrosian (2004), Hoffmann-Rothe (2002), Unsworth (2002), entre otros, han identificado una estrecha correlación entre las zonas conductivas con las fallas activas.

En algunos casos, la posible continuidad de una falla en profundidad, mostraba discontinuidades en la distribución de las resistividades.

Sin embargo, es importante mencionar que una buena interpretación depende, básicamente, de la correlación de todos los estudios disponibles (geológicos, geofísicos, estructurales, entre otros).

El estudio magnetotelúrico realizado en el valle del Cusco ha permitido identificar cuatro zonas conductivas (C1-C4) y dos zonas resistivas (R1, R2). La interpretación conjunta de este estudio, con los estudios geológicos y estructurales se presenta en la Figura 5. Así:

La zona conductiva C1

Localizada al suroeste del perfil MT, estaría correlacionada con el contacto de las formaciones Kayra y Soncco (Eoceno Medio-Oligoceno Inferior).

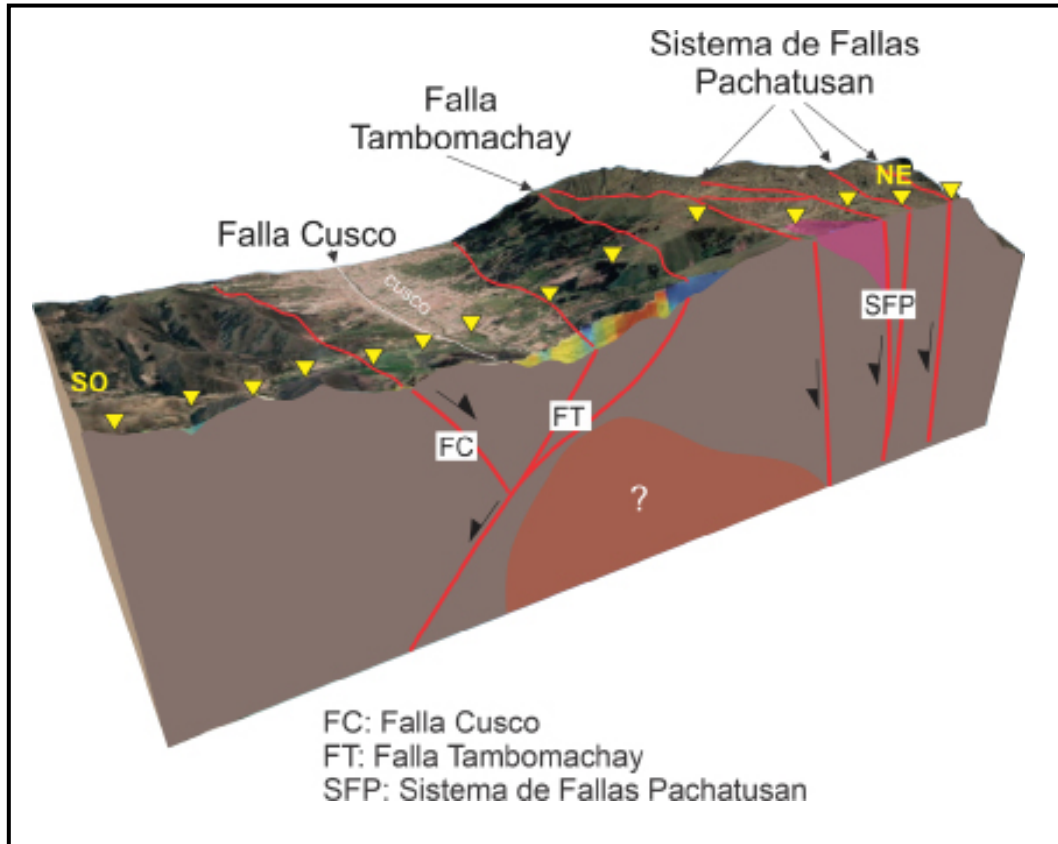
Asimismo, la presencia de agua a niveles superficiales, podría estar influenciando en la respuesta conductiva de esta zona.

La zona conductiva C2 (figuras 4 y 5), observada en el extremo noreste del perfil, sugiere una fuerte correlación con las trazas del Sistema de Fallas Pachatusan que actúa como una falla vertical y con buzamiento al suroeste.

Al prolongar la continuidad de las trazas y siguiendo la tendencia general de la zona conductiva en profundidad (Figura 5), es posible sugerir que este sistema de fallas alcanza profundidades mayores a los 6 km.

Figura 5

Representación tridimensional de la interpretación de la distribución de la resistividad con los estudios geológicos y estructurales del valle del Cusco. La línea roja representa la posible continuación en profundidad de los sistemas de fallas. El signo de interrogación representa a la zona de alta resistividad, probablemente asociado con el stock diorítico que aflora en Sacsayhuamán.

**Las zonas conductivas C3 y C4**

Ubicadas en la parte central del modelo podrían estar asociados con la expresión superficial de las fallas Cusco y Tambomachay (Figura 5).

Analizando la forma de estas zonas conductivas en profundidad y su correlación con las fallas, es posible sugerir que la falla Cusco no es profunda, en todo caso, no sobrepasaría los 4 km y estaría buzando al noreste; mientras tanto, la continuidad de la falla Tambomachay se extendería por debajo de los 6 km en dirección suroeste.

La respuesta conductiva en esta zona también podría estar sustentada en la posible circulación de fluidos (agua) a través de la falla.

Las zonas resistivas R1 (Figura 5) observadas en el extremo suroeste y noreste pueden estar identificadas con las rocas volcánicas de la Formación Rumicolca (Neógeno-Cuaternario) y las secuencias sedimentarias de la Formación Kayra (Eoceno Medio).

La zona resistiva R2 fue identificada debajo del valle del Cusco y por debajo de las zonas conductivas C3 y C4. Este cuerpo de alta

resistividad que incrementa en profundidad, podría ser interpretado como una roca intrusiva enterrada, probablemente corresponde al *stock* diorítico (Cretácico) que aflora en Sacsayhuamán (Carlotto et al., 2011).

Otra posible explicación podría estar asociada a las rocas volcánicas de la Formación Rumicolca (Neógeno-Cuaternario).

En general, los resultados de este estudio sugieren que los sistemas de fallas del valle del Cusco tienen un régimen extensivo de fallas imbricadas que consisten en fallas normales y activas con continuidad en profundidad (> 6 km). Asimismo, ha permitido brindar mayor información de la falla Cusco.

De acuerdo al modelo resistivo y su correlación con los estudios geológicos, no sobrepasaría los 4 km de profundidad y estaría buzando al noreste. Por su ubicación y profundidad superficial también se constituye como otra estructura tectónica activa que incrementa el peligro sísmico en el valle del Cusco.

CONCLUSIONES

La caracterización magnetotelúrica efectuada en las principales fallas y sistemas de fallas de Cusco, a lo largo del perfil SO-NE (Figuras 4 y 5) muestra que el subsuelo está conformado por cuatro zonas conductivas (C1-C4) y dos zonas resistivas (R1 y R2).

Estas zonas conductivas están estrechamente correlacionadas con la información geológica estructural de la zona de estudio y con la posición superficial de las fallas Cusco, Tambomachay y el Sistema de Fallas Pachatusan.

Asimismo, la distribución de la resistividad en profundidad, permite sugerir que estas fallas podrían tener continuidad a lo largo de las zonas conductivas.

Esta característica evidencia que estas fallas son activas y prueba de ello son las deformaciones cuaternarias observadas y analizadas por Benavente et al. (2013) y las mediciones de cambios de velocidad efectuadas por Taipei et al. (2017).

Por otro lado, las fuentes históricas indican que la ciudad del Cusco y sus alrededores han sido afectados por sismos de hasta 7.2 de magnitud, con pérdidas de vidas humanas y destrucción en la infraestructura; por lo tanto, es imprescindible continuar con los estudios aplicando estas técnicas y metodologías en el resto del valle del Cusco y en las regiones vulnerables del Perú, a fin ampliar el conocimiento del subsuelo del valle del Cusco y, de esta forma, contribuir a la reducción del riesgo asociado a la activación de fallas geológicas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. José Cárdenas de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC).

A los estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional San Antonio Abad de Cusco.

Al Dr. Víctor López Durand, Decano de la Facultad de Zootecnia y Agronomía de esta misma universidad, por las facilidades obtenidas para instalar los equipos magnetotelúricos y garantizar la seguridad de los mismos en los espacios asignados.

Nuestro agradecimiento. Al Ing. José Huilca de la Dirección de Recursos Minerales y Energéticos del INGEMMET, por su apoyo durante los primeros días del trabajo de campo.

A la Universidad de Alberta por los algoritmos de procesamiento y los conocimientos compartidos.

Finalmente, nuestro agradecimiento a los revisores por sus valiosos aportes y comentarios.

REFERENCIAS

- Balasco, M., Giocoli, A., Piscitelli, S., Romano, G., Siniscalchi, A., Stabile, T.A. & Tripali, S., 2015. Magnetotelluric investigation in the High Agri Valley (southern Apennine, Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 15, 843-852.
- Benavente, C., Delgado, F., Taípe, E., Audin, L., & Pari, W., 2013. Neotectónica y Peligro Sísmico en la Región Cusco. Technical report, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima.
- Cabrera, J., Sébrier, M. & Mercier, J.L., 1991. Plio-Quaternary geodynamic evolution of a segment of the Peruvian Andean Cordillera located above the change in the subduction geometry: the Cuzco region. *Tectonophysics*, v. 190 (2-4), 331-362.
- Caldwell, T.G., Bibby, H.M. & Brown, C., 2004. The magnetotelluric phase tensor. *Geophys. J. Int.*, v. 158 (2), 457-469.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., & Carlier, G., 2011. Geología del Cuadrángulo de Cusco 28-s - 1:50 000. INGEMMET. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 138, 255 p., 6 mapas.
- Carlotto, V. (2013). Paleogeographic and tectonic controls on the evolution of Cenozoic basins in the Altiplano and Western Cordillera of southern Peru. *Tectonophysics*, v. 589, 195-219.
- Egbert, G., & Booker, J., 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. *Geophysics. Journal International*, v. 87 (1), 173–194. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1986.tb04552.x>.
- Guardia, P. & Tavera, H., 2015. Análisis de la microsismicidad asociada a las fallas Tambomachay y Qoricocha, Cusco. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú.*, v. 110, 201-204.
- Hoffmann-Rothe, A., 2002. Combined structural and magnetotelluric investigation across the West Fault Zone in northern Chile. University of Potsdam, Tesis de doctorado, 118 p.
- Pavez, M., 2015. Estudio de resistividad eléctrica mediante magnetotélúrica, en la zona de falla Liquiñe-Ofqui entorno al volcán Villarica. Universidad de Chile. Tesis de Magister, 100.
- Rodi, W. & Mackie, R.L., 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, v. 66 (1), 174-187. <https://doi.org/10.1190/1.1444893>.
- Rosell, L., 2019. Estudio morfotectónico y paleosísmico de las fallas Tambomachay y Qoricocha, implicancia en el peligro sísmico de la region Cusco. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Tesis de Ingeniero, 136.
- Sébrier, M., Mercier J.L., Mégard, F., Laubacher, G. & Carey-Gaihardis, E., 1985. Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of south Peru. *Tectonics*, v. 4 (7), 739-780.
- Silgado, E., 1978. Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). INGEMMET, Boletín N° 3, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, v. 3, 10.
- Smirnov, M., Korja, T., Dynesius, L., Pedersen,

- L.B. y Laukkanen, E., 2008. Broadband magnetotelluric instruments for near-surface and lithospheric studies of electrical conductivity: a Fennoscandian pool of magnetotelluric instruments. *Geophysica*, v. 44, 31–44.
- Taipe, E., 2017. Monitoreo geodésico de fallas activas en la región Cusco-Periodo 2017. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, DGAR, Informe Técnico, 26.
- Triahadini, A., Aizama, K., Teguri, Y., Koyama, T., Tsukamoto, K., Muramatsu, D., Chiba, K. & Uyeshima, M., 2019. Magnetotelluric transect of UNzen graben, Japan: conductors associated with normal faults. *Earth Planets and Space*, 71-28. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1004-z>.
- Unsworth, M., 2002. The Role of Crustal Fluids in Strike-slip Tectonics: New Insights from Magnetotelluric Studies. *Turkish Journal Earth Sciences*, v. 11 (193-203).
- Unsworth, M.J. y Bedrosian, P., 2004. Electrical resistivity structure at the SAFOD site from magnetotelluric exploration. *Geophys. Res. Lett.*, v. 31, L12S05, <http://dx.doi.org/10.1029/2003GL019405>.
- Wimpeny, S., Benavente, C., Copley, A., García, B., Rosell, L., O’Kane A. & Aguirre, E., 2020. Observations and dynamical implications of active normal faulting in South Peru. *Geophysical Journal International*, v. 222, 27-53. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa144>.