

FALLA AMARU: TECTÓNICA ACTIVA Y PALEOESFUERZOS EN EL ALTIPLANO SUR PERUANO

Benavente, C. & Delgado, F.

Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico INGEMMET, Av. Canadá 1470, Lima, Peru; cbenavente@ingemmet.gob.pe

INTRODUCCIÓN

En el Altiplano sur peruano, Departamento del Cusco, evidencias geomorfológicas muestran que a pesar de su baja sismicidad, esta región ha sufrido sismos superficiales con ruptura visible, que deben ser considerados en las evaluaciones de peligro sísmico. En el presente trabajo ponemos en evidencia, deformación activa con ruptura superficial a lo largo de aproximadamente 50 km (Figura 1) en las alturas de la margen derecha del río Vilcanota (Provincia de Canchis), información que es complementaria a los estudios realizados por *Sébrier et al. (1985)*, *Cabrera (1988)* & *Benavente et al., (2010 y 2012, en revisión)*.

Por consiguiente este resumen tiene como objetivo describir las características morfo-estructurales de una falla activa no reconocida previamente, y establecer su importancia en el contexto tectónico del Altiplano sur peruano.

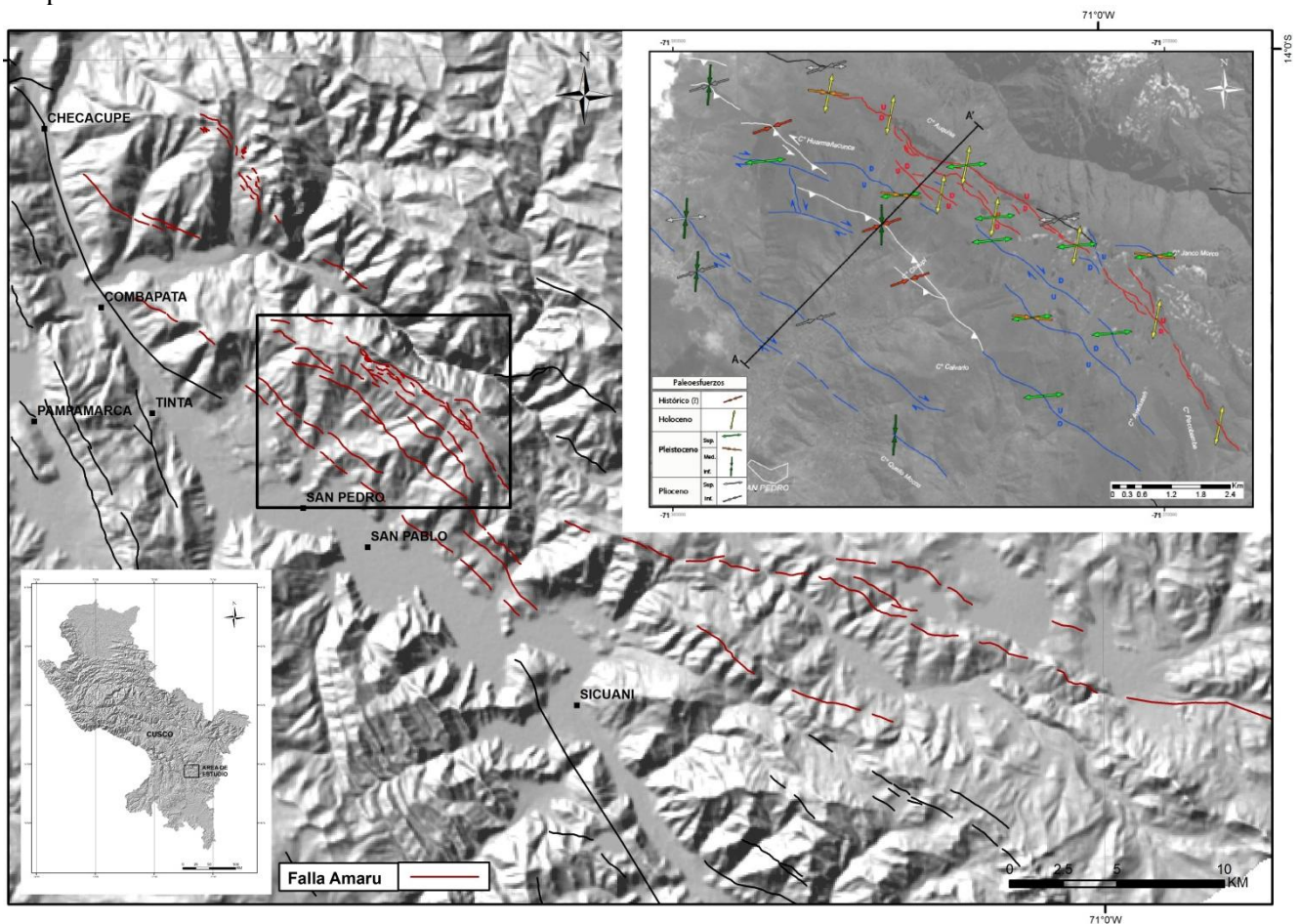


Figura 1: El mapa muestra en líneas de color rojo la traza de la Falla Amaru, las líneas negras son fallas cuaternarias y activas de la región Cusco (Benavente et al., en revisión). La figura del lado superior derecho es un acercamiento del sector central de la falla, muestra una propuesta de paleoesfuerzos para los últimos 5 Ma, definidos a partir del procesamiento de 350 datos de microtectónica.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA FALLA AMARU

La Falla Amaru, de dirección NO-SE, se reconoce por rupturas de la superficie produciendo desniveles de 10 m que se prolonga de manera discontinua sobre una longitud de 50 km. A lo largo de la traza se puede observar que esta afecta la topografía actual compuesta de morrenas laterales y depósitos fluvio-glaciares cuaternarios. En los sectores norte y sur de la falla, se observa un escarpe principal acompañado por 2 segmentos de fallas secundarias de longitud aprox. 11 km y 26 km respectivamente. El sector medio de la falla de aproximadamente 18 km de longitud, se ubicado entre los poblados de Combapata y Sicuani. Esta zona se diferencia por mostrar un mayor número de segmentos paralelos entre sí, de longitudes similares, y que se encuentran limitados hacia el este por un escarpe mayor, mas degradado y que separa los mencionados depósitos glaciares con rocas volcánicas sedimentarias del Grupo Mitu y rocas volcánicas Cenozoicas.

Los escarpes de fallas que cortan los depósitos fluvio-glaciares y glaciares cuaternarios tienen un aspecto fresco. Sin embargo, en muchos de los casos hay una variación en la pendiente del plano de falla, lo que junto al análisis microtectónico nos permitió reconstruir antiguos movimientos de la falla. Asimismo se pudo identificar las reactivaciones más recientes en los tres sectores, donde, el escarpe esta levemente degradado y al pie de sus faz libre se encuentran depósitos coluviales.

Cabe mencionar que se tomaron muestras, aunque los datos no se presentarán en este trabajo por estar aun en laboratorio. Las muestras para Carbono 14 fueron extraídas de trincheras transversales a la falla con la finalidad de obtener la fecha de sus más recientes reactivaciones por un lado y por otro lado se tomó muestras de las morrenas laterales afectadas por los diferentes segmentos de falla para datación por isótopos cosmogénicos Be¹⁰.

CINEMÁTICA Y CÁLCULO DE PALEOESFUERZOS

En el sector norte y sur se pueden observar que el movimiento más reciente de la falla afecta morrenas con un desplazamiento de tipo normal. En el sector central identificamos escarpes de fallas con direcciones N150° a N120° y con buzamientos tanto hacia el norte como hacia el sur. Además estos escarpes enseñan diferentes cinemáticas, donde la reactivación más reciente es de tipo inverso.

El análisis morfológico, geométrico y cinemático de los escarpes del sector central nos permite sugerir una cronología de esfuerzos para los últimos 5 Ma y un estilo de deformación (Figura 2A). Determinamos a partir del análisis poblacional de fallas, análisis de familias de estrías y cálculo de tensores de esfuerzos en el programa para geología estructural *FaultKin 5* (Allmendinger (2012), donde se procesaron 350 medidas.

En la Figura 2 se muestra representados por flechas las direcciones de los esfuerzos y las trazas de fallas en diferentes colores para realzar la cronología de reactivaciones.

Las trazas en color blanco son interpretadas como la última reactivación del sistema. Se pone en evidencia que afectan a la topografía actual con un movimiento inverso. La falla tiene un buzamiento casi vertical (82° S) (Figura 2A y 2D) y el cálculo del tensor del esfuerzo principal (σ_1) indica un acortamiento promedio de dirección N40°E.

Las fallas representadas por líneas rojas cortan morrenas laterales y depósitos fluvio-glaciares (Figura 2C), además de alinear lagunas o charcas de agua. El último movimiento es de tipo normal con un desplazamiento vertical de 0.60 m. Se observan fallas normales con buzamientos opuestos formando grábenes en algunos sectores. Las morrenas afectadas podrían estar relacionadas con la glaciación de hace 11 000 BH (Figura 2A y 2B). El cálculo del tensor del esfuerzo principal (σ_1) indica una dirección de extensión promedio de N12°E.

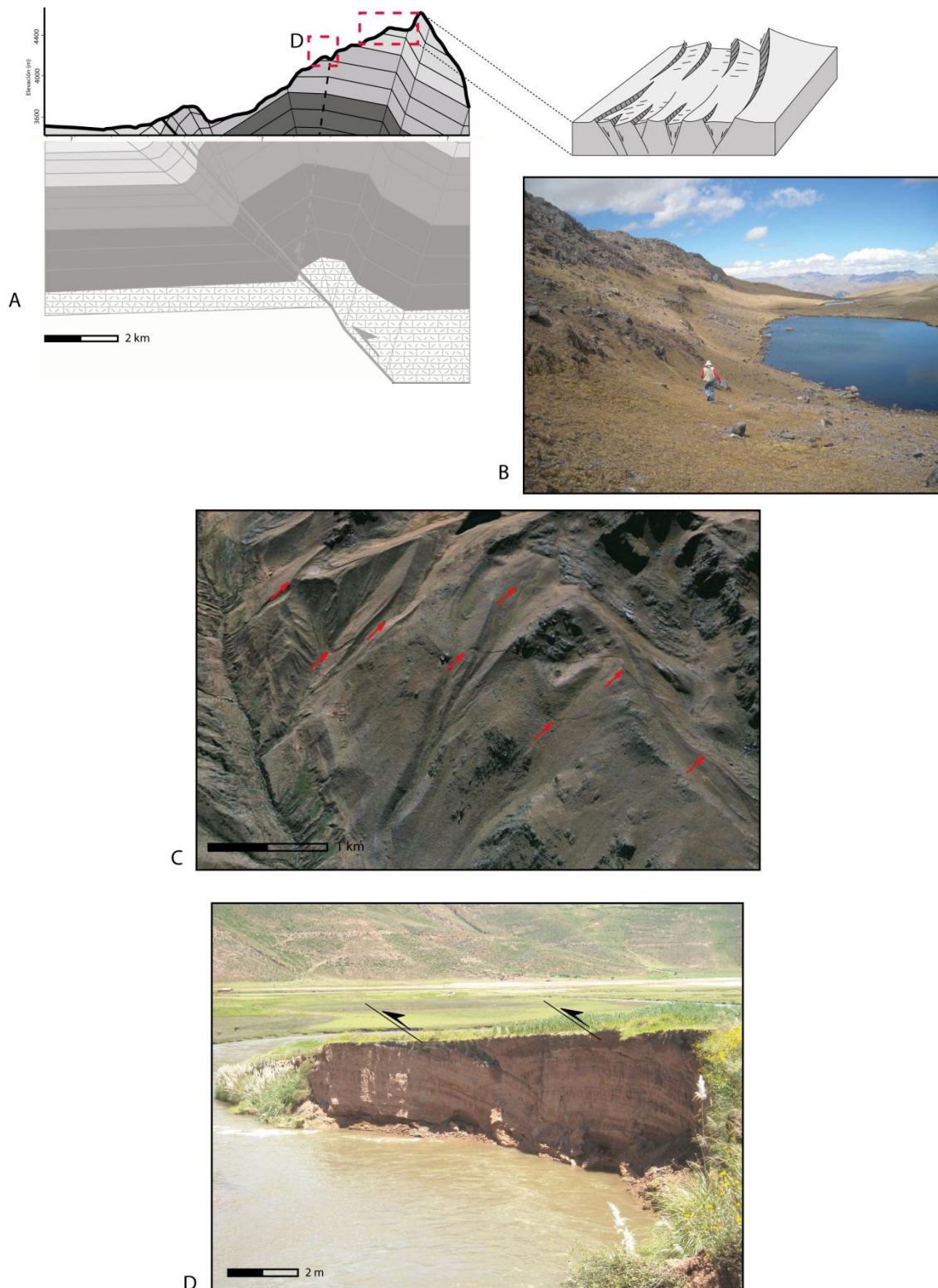


Figura 2: 2A muestra una sección estructural a partir de datos estructurales de los afloramientos, en ella se hace acercamiento (en rectángulos rojos) donde se muestran la disposición y ubicación de las fallas normales con buzamientos opuestos. La figura 2B muestra el escarpe de falla principal. La Fig. 2C, muestra la Falla Amaru (ver líneas rojas) cortando depósitos glaciares y fluvio glaciares. La Figura 2D muestra los movimientos inversos de la falla, ubicadas en el frente de deformación.

Las fallas en color azul, muestran estructuras con posibles reactivaciones durante el pleistoceno medio-superior? y son agrupadas por su compatibilidad geométrica-cinemática. Los escarpes se encuentran más degradados, sus faz libres presentan cambios de pendiente, donde se pudieron observar diferentes direcciones de estrías en cada una de las partes. Realizamos una cronología de las estrías y de los tectoglifos que nos permitieron proponer tres estados de esfuerzos: (1) para el Pleistoceno superior un esfuerzo principal (σ_1) que indica una dirección de extensión promedio a N80°E; (2) para el Pleistoceno medio a superior el esfuerzo principal (σ_1) indica acortamiento N98°E; y (3) para el Pleistoceno inferior el esfuerzo principal (σ_1) indica acortamiento N8°E.

Asimismo pudimos observar estrías anteriores a las descritas en el párrafo anterior tanto en la parte baja como alta del área de estudio indicando un esfuerzo principal (σ_1) asociado a extensión con dirección N80°E y un esfuerzo principal (σ_1) asociado a compresión con dirección N55°E, datos que son compatibles con la deformación pliocena superior e inferior respectivamente descrita por *Cabrera (1988)* y *Lavenu & Mercier (1988)*.

IMPLICANCIAS GEODINÁMICAS, INTERPRETACIONES Y CONCLUSIONES

Los resultados que exponemos en este artículo conciernen la evolución plio-cuaternaria de parte del Altiplano sur peruano, donde en base a trabajos de campo se pudieron reconocer cambios en el régimen tectónico. Los datos muestran estados de esfuerzos compresivos y extensivos durante el Plioceno, datos que son coherentes con los señalados por *Mercier et al. (1992)* y *Sébrier et al. (1985)*, *Cabrera (1988)* y *Lavenu & Mercier (1991)*; el evento compresivo estaría ligado a la disminución del ángulo de subducción de la placa oceánica (Espurt et al., 2008), proceso que generaría mayor fricción, acoplamiento entre las Placas de Nazca-Sudamericana y consecuente levantamiento de los Andes; mientras que el evento de extensión estaría ligado a un tiempo de reacomodo que sirvió para el relleno de depresiones.

Para el Cuaternario son conocidos dos regímenes tectónicos para los Altos Andes, que indican compresión aproximadamente E-O durante el Pleistoceno inferior y extensión N-S durante el Pleistoceno medio hasta la actualidad (Mercier et al., 1992 y Sébrier, 1985). Con el presente estudio complementamos y proponemos que durante el Cuaternario hubo por lo menos cuatro cambios en el régimen tectónico: i) compresión indicando un eje de acortamiento N8°E durante el Pleistoceno inferior; ii) compresión N98°E durante el Pleistoceno inferior a medio; iii) extensión con dirección N80°E durante el Pleistoceno medio a superior y; iv) extensión holocena con dirección aproximada N-S. Asimismo pudimos determinar que la última reactivación de la Falla Amaru (Histórico?) fue con un movimiento de tipo inverso, deformación que afecta la topografía actual, este último estado tectónico tendría relación con las deformaciones compresivas observadas por Benavente et al., (en revisión) en las localidades de Corcca, Pilpinto, Accha, Acomayo, Paruro y Capacmarca.

De la información sismológica instrumental podemos decir que el mecanismo focal hallado para el sismo de Capacmarca del 2003 dio como resultado un mecanismo de tipo inverso (Comunicación personal Hernando Tavera), punto que ratificaría el estado de esfuerzo actual compresivo en el área de estudio; además este tendría relación con los mecanismos focales inversos hallados de sismos superficiales por Stauder (1975) y Suarez (1983, 1990) a lo largo de los Andes peruanos.

Posteriormente, la sección geológica construida a partir de los datos estructurales de los afloramientos nos permite (Figura 2A) proponer que este sector del Altiplano presenta un estilo de deformación compresional, producto del levantamiento en los últimos 10 Ma?, de ahí el incremento en el esfuerzo litosférico vertical que es compatible con la partición de esfuerzos generados por la subducción. Los períodos de extensión son entonces una compensación y/o acomodamiento de la corteza superior en repuesta a la compresión regional.

Finalmente, el área de estudio se ubica en una zona donde la Placa de Nazca se contornea; Schneider & Sacks (1987) y Grange et al. (1984) muestran la variación de los esfuerzos en una zona donde se contornea la Placa de Nazca a partir del análisis de sismos profundos (100 km), queda por definir la relación con la deformación en superficie.

REFERENCIAS

- Allmendiger, R.W. 2012. Faultkin 5 for Windows v.12 for analyzing up to 1000 fault planes at a time for non-Commercial use only.
- Benavente C., Cárdenas J., Concha R., García B. y Morales M. (2010) Evidencias de paleosismos en la estratigrafía de la cuenca Cuaternaria Cusco, Perú. XV Congreso Peruano de Geología, Cusco. Vol. Resúmenes Extendidos, p 1280-1283.
- Benavente, C., Delgado, F., Taípe, E., & Audin, L. (en revisión). Neotectónica y peligro sísmico de la Región del Cusco. Boletín en revisión. INGEMMET.
- Cabrera J. (1988). Néotectonique et sismotectonique dans la Cordillere Andine au niveau du changement de géométrie de la subduction: La Région de Cuzco (Pérou). Thesis, pp. 268., Univ. Paris-Sud, Orsay, 1988.
- Esput, N., Funicello, F., Martinod, J., Guillaume, B., Regard, V., Faccenna, C., Brusset, S., 2008. Flat subduction dynamics and deformation of the South American plate: insights from analog modeling. *Tectonics* 27. VOL. 27, TC3011, 19 PP., 2008
- Grange, F., Hatzfeld, D., Cunningham, P., Molnar, P., Roecker, S.W., Suarez, G., Rodrigues, A. and Ocola, L., 1984. Tectonic implications of the microearthquake seismicity and fault plane solutions in southern Peru. *J. Geophys. Res.*, 89: 6139-6152.
- Lavenu, A. & Mercier, J.L., 1991. Evolution du regime tectonique d l'Altiplano et de la Cordillere Orientale des Andes de Bolivie d MioceÁne supeÁrieur aÁ l'Actuel. *GeÁodynamique* 6, 21±55.
- Mercier, J., Sébrier, M., Lavenu, A., Cabrera, J., Bellier, O., Dumont, F. & Macharé, J. 1992. Changes in the Regime above a subduction zone of Andean Type: The Andes of Perú and Bolivia during the Pliocene-Pleistocene. *Journal of Geophysical Research*, vol. 97, N°38, pp 11,945-11,982
- Schneider, J. & Sacks, S. 1987. Stress in the Contorted Nazca Plate Beneath Southern Perú from local Earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, vol. 92. N°B13, pp 13,887-13.902.
- Sébrier, M., J. L. Mercier, F. Mégar, G. Laubacher, and E. Carey-Gailhardis (1985), Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of south Peru, *Tectonics*, 4(7), pp739–780
oi:10.1029/TC004i007p00739.
- Stauder, W. (1975). Subduction of the Nazca plate under Perú as evidenced by focal mechanism and by seismicity. *J. Geophys. Res.* 80, 053-1064.
- Suarez, G., Gagnepain, J., Cisternas, A., Hatzfeld, D., Molnar, P., Roecker, S., y Viodé, J. (1990). Tectonics deformation of the Andes and the configuration of the subducted slab in central Peru: result from a microseism experiment. *Geophys. J. Int.* 103, pp1-12.
- Suarez, G., Molnar, P. y Burchfield, B. (1983). Seismicity, fault plane solutions, depth of faulting and active tectonics of the central Andes of Peru, Ecuador y southern Colombia. *J. Geophys. Res.* 88, pp10403-10428.