

# ESTUDIO PALEOSISMOLÓGICO DEL SECTOR NOROESTE DE LA FALLA GEOLÓGICA ACTIVA TAMBOMACHAY

Informe Técnico



Región del Cusco

Ciudad del Cusco



2017

# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introducción</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2. Contexto geológico</b>   | <b>3</b>  |
| <b>3. Metodología de estudio</b>   | <b>4</b>  |
| 3.1. Selección de zonas de interés . . . . .                             | 4         |
| 3.2. Excavación y preparación de la trinchera paleosismológica . . . . . | 5         |
| 3.3. Identificación de evidencias paleosísmicas y muestreo . . . . .     | 5         |
| 3.4. Fotologing de las paredes de la trinchera . . . . .                 | 5         |
| 3.4.1. Interpretación de eventos sísmicos . . . . .                      | 6         |
| 3.5. Cálculo de Magnitud momento (M) . . . . .                           | 6         |
| 3.6. Cálculo del intervalo de recurrencia . . . . .                      | 6         |
| <b>4. RESULTADOS</b>   | <b>6</b>  |
| 4.1. Trinchera Tambomachay . . . . .                                     | 6         |
| 4.1.1. Registro estratigráfico . . . . .                                 | 6         |
| 4.2. Interpretación paleosísmica . . . . .                               | 8         |
| 4.3. Estimación de paleomagnitudes . . . . .                             | 9         |
| 4.4. Intervalo de recurrencia . . . . .                                  | 11        |
| 4.5. Tasas de desplazamiento . . . . .                                   | 11        |
| <b>5. Discusiones y Conclusiones</b>                                     | <b>11</b> |

## 1. Introducción

La actividad sísmica del Perú tiene su origen en la convergencia de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, durante este proceso se genera fricción y acumulación de esfuerzos, reflejados en la deformación de la corteza y sismos superficiales (<30km de profundidad).

El Cusco fue afectado por terremotos en 1950, 1650 y recientemente en 1986, los dos primeros mayores a M7 (Silgado, 1978).

A 3km al norte de la ciudad del Cusco, se ubica la falla geológica activa Tambomachay, ésta pertenece a una amplia y larga zona de deformación, donde las estructuras tienen tendencias NO-SE y E-O, conocida como el sistema de fallas Zurite-Cusco-Urcos-Sicuani (Benavente et al., 2013).

Estudios recientes muestran claras evidencias morfológicas y estructurales de su actividad cuaternaria, (Sébrier et al., 1985; Mercier et al., 1992; Cabrera, 1988; Benavente et al., 2013), por lo que deberían ser catalogadas como una fuente sismogénica importante; sin embargo no se tiene una caracterización completa que permita evaluar el peligro sísmico a la cual está expuesta la ciudad del Cusco, que alberga en la actualidad ~ 500 mil habitantes.

En el presente trabajo, presentamos un estudio paleosismológico en la sector oeste de la falla Tambomachay, el cual nos permitió calcular tasas de desplazamiento, intervalos de recurrencia y edades de eventos sísmicos reciente.

## 2. Contexto geológico

La falla Tambomachay forma parte de una zona extensa ~ 200 km en longitud de deformación ubicada entre Cordillera Oriental y el Altiplano (Figura 1), en esta zona las estructuras se caracterizan por ser principalmente de cinemática normal durante el Cuaternario (Sébrier et al., 1985; Mercier et al., 1992; Cabrera, 1988; Benavente et al., 2013).

La falla Tambomachay tiene una longitud ~ 20km y una orientación NW-SE. Esta falla pone en contacto rocas del cretácico (hanging-wall) con rocas del Eoceno-Oligoceno (foot-wall) (Carlotto et al., 2011), es resultado de una tectónica polifásica con evidencias de movimientos antiguos inversos y de rumbo, a lo que debe su traza lineal (Gregory, 1916; Cabrera, 1988).

Su actividad reciente, ha formado un escarpe acumulado de ~ 400m que exhibe facetas triangulares indicando su cinemática normal, su más reciente actividad ha generado escarpes con alturas promedio de 2m, y un máximo desplazamiento vertical de 4m expuesto en su extremo oeste, a una altitud de 4100m. Estos escarpes separan el basamento (Eoceno-Oligoceno) de los conos aluviales cuaternarios (Cabrera, 1988).

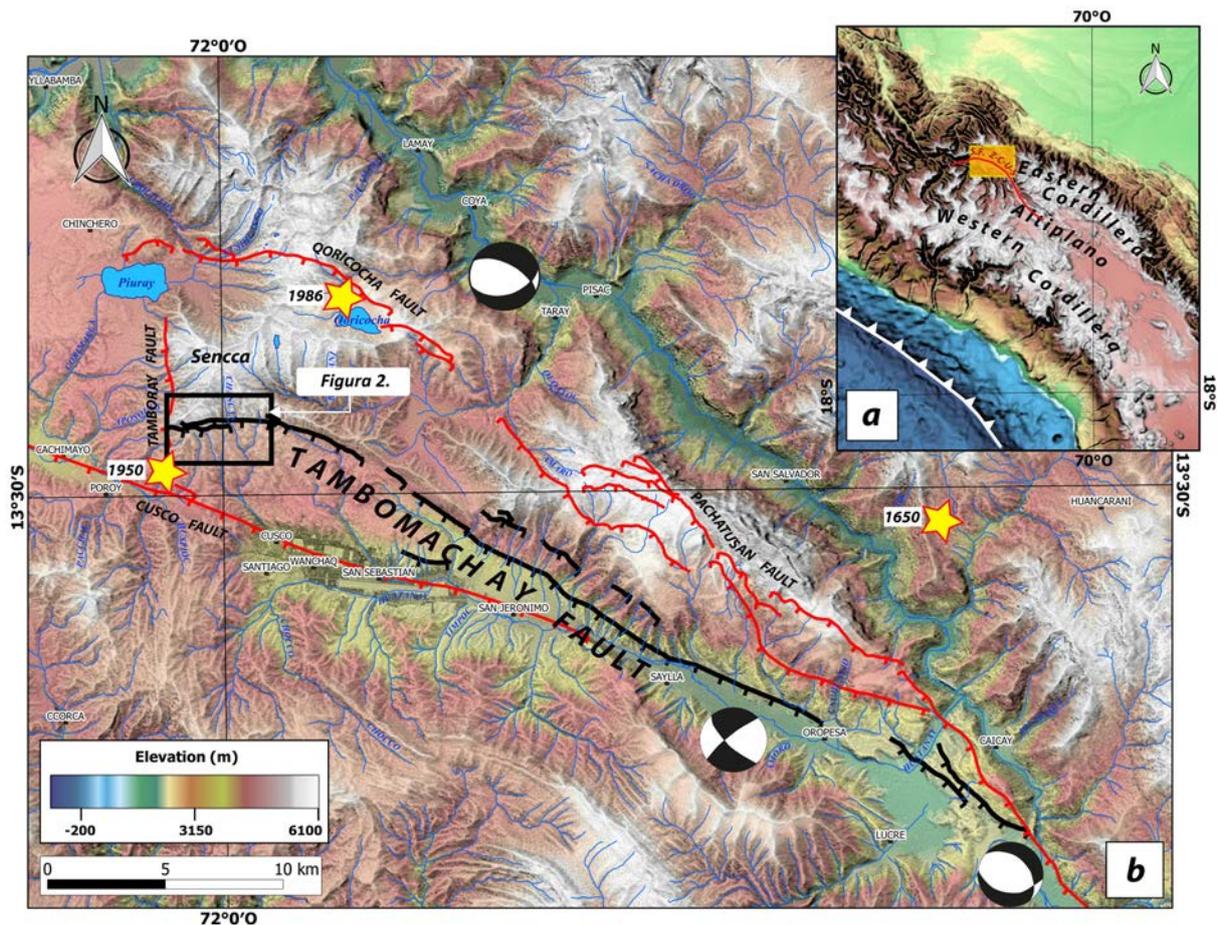


Figura 1: (a) Mapa topográfico, muestra la localización del sistema de falla Zurite-Cusco-Urcos-Sicuani(SF Z-C-U-S, en línea roja) ubicado entre la cordillera oriental y el altiplano, (b) Falla Tambomachay (línea negra) dentro del sistema de fallas Z-C-U-S (líneas rojas), las estrellas amarillas indican los epicentros de los eventos sísmicos recientes más importantes (1650,1950 y 1986) ocurridos en Cusco (Silgado, 1978), además los mecanismos focales de terremotos superficiales (< 40km) con magnitudes momento > 5,0

### 3. Metodología de estudio

#### 3.1. Selección de zonas de interés

En base a análisis de imágenes satelitales de alta resolución (e.g. del satélite pleiades), identificamos el trazo de la falla Tambomachay, y los lugares donde esta corta depósitos cuaternarios. Las imágenes muestran que en el sector oeste, la falla esta bien conservada, a diferencia del sector central y este, donde el escarpe fue borrado por la expansión urbana. En tal sentido, el sector oeste, es el lugar potencial para realizar estudios paleosismológicos.

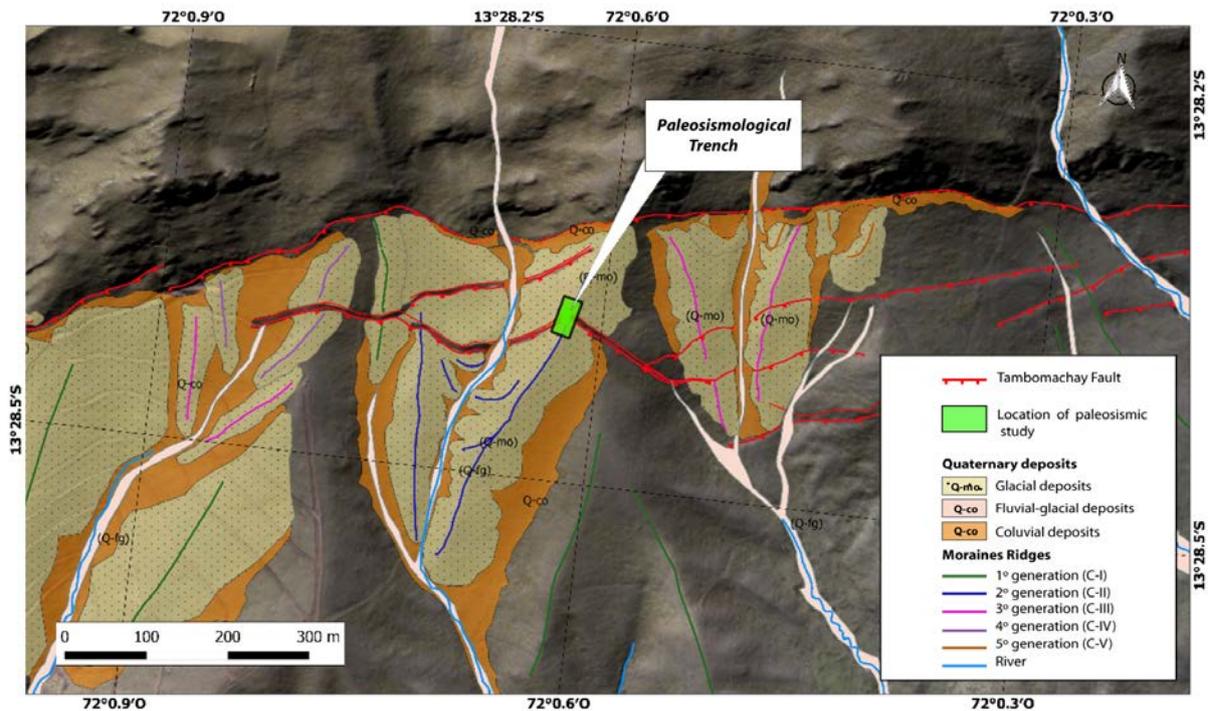


Figura 2: Mapa de depósitos cuaternarios afectados por la reciente actividad de la falla Tambomachay (extremo oeste), el rectángulo verde muestra la ubicación de la trinchera.

### 3.2. Excavación y preparación de la trinchera paleosismológica

Excavamos una trinchera de: 7m de longitud, 2m de ancho y 3m de profundidad, en el extremo oeste de la falla Tambomachay, en la ladera sur del Cerro Sencca, de manera transversal a un escarpe de falla conservado que se encuentra desplazando morrenas laterales (Figura2). Se limpió las paredes hasta que éstas quedaran verticales, para tener una amplia y clara visualización de la estratigrafía y estructuras de deformación. Después se grilló la pared más representativa utilizando clavos con marcas rojas, colocados a 1 metro de distancia unos de otros, distribuidos de manera vertical y horizontal.

### 3.3. Identificación de evidencias paleosísmicas y muestreo

Identificamos la secuencia estratigráfica, y definimos los estratos según su composición, textura, color y continuidad lateral; los niveles identificados son descritos en orden de base a tope, Así mismo, se identificaron estructuras y niveles deformados relacionados a eventos de falla o paleoterremotos. Para precisar las edades de los eventos identificados se tomaron muestras de sedimento orgánico las cuales fueron datadas por espectrometría con aceleradores de masa (AMS-C14) en el laboratorio BETA Analysis Inc. USA.

### 3.4. Fotologing de las paredes de la trinchera

Tomamos 350 fotografías a 20Mpx de resolución, perpendiculares a la pared elegida, considerando un traslape de ~70% entre ellas, Estas fotografías se procesaron en el programa Agisoft PhotoScan para la construcción de un ortomosaico, el cual refleja la geometría sin deformación de la pared. Sobre este ortomosaico, tomamos medidas precisas en cuanto a espesores, longitudes y demás dimensiones, que son necesarias para la caracterización de evidencias paleosísmicas.

### 3.4.1. Interpretación de eventos sísmicos

Interpretamos la cantidad de eventos sísmicos en base a la identificación de las unidades estratigráficas fechadas, identificación y datación de cuñas coluviales y estructuras de deformación; resultados de las dataciones por AMS  $C^{14}$ , y reconstrucción de la trinchera.

Gracias a la reconstrucción de la trinchera, elaboramos un modelo esquemático, que muestra la evolución cronológica de los procesos sedimentarios, y eventos sísmicos con sus respectivos desplazamientos.

### 3.5. Cálculo de Magnitud momento (M)

Calculamos la magnitud momento correspondiente a cada evento sísmico, utilizamos la fórmula empírica propuesta por Wells and Coppersmith (1994), (ecuación:1).

Para la aplicación de esta fórmula, se consideró los valores de los desplazamientos hallados durante la reconstrucción de la trinchera.

$$M = a + b * \log(AD), \quad (1)$$

Donde:

$M$  : es la Magnitud momento  
 $a$  : 6.78 (coeficiente)  
 $b$  : 0.65 (coeficiente)  
 $AD$  : Desplazamiento promedio

### 3.6. Cálculo del intervalo de recurrencia

Para el cálculo del intervalo de recurrencia se consideró las edades de las cuñas coluviales, ya que éstas son las primeras evidencias post-sísmica para cada evento.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Trinchera Tambomachay

En la trinchera identificamos depósitos morrénicos de edad Holocena, datados por núclidos cosmogénicos  $Be^{10}$  (14,000 años) (Com. pers. con Carlos Benavente).

#### 4.1.1. Registro estratigráfico

Las unidades estratigráficas se describen en el orden de base a tope.

**Unidad A (U-A)** Material clasto soportado, que se compone de una matriz limo arenosa de color rojizo. Los clastos son de arenisca, sus formas varían de angulosos a subredondeados, y el diámetro de estos varía de 1cm a 14 cm. Esta unidad se interpreta como depósito morrénico.

**Relleno Coluvial (F)** Material matriz soportado, de matriz limo arenosa de color rojizo. Los clastos son de arenisca, sus formas varían de angulosos a subredondeados, y el diámetro de estos varía de 1cm a 50 cm. Esta unidad fue muestreada para datación por AMS C14.

**Cuña coluvial I (C-I)** Material matriz soportado, limo arenoso de color marrón oscuro. Los clastos son de arenisca y angulosos, su diámetro varía de 2 cm a 20 cm, la relación matriz/clasto está en proporción de 1 : 1. Además, cabe resaltar que los clastos ubicados en la base tienen una dirección SW. Esta unidad fue muestreada para datación por AMS C14.

**Unidad B (U-B)** Material matriz soportado, limo arenoso de color rojo parduzco, que envuelve clastos de arenisca, de forma subangulosa a subredondeada, y diámetro que varían de 2 cm a 15 cm. Esta unidad fue muestreada para datación por AMS C14.

**Cuña coluvial II (C-II)** Material matriz soportado, limo arenoso fino de color marrón oscuro. Unidad muestreada para datación por AMS C14.

**Unidad C (U-C)** Material matriz soportado, limo arenoso de color marrón oscuro. Los clastos son de arenisca, con formas angulosas y diámetro promedio de 4 cm, estos sólo están presentes en la base. Esta unidad contiene algunas raíces superficiales y fue muestreada para datación por AMS C14.

**Cuña coluvial III (C-III)** Material matriz soportado, limo arenoso de color marrón oscuro. Los clastos son de arenisca, de forma subangulosa a subredondeada, su diámetro varía de 1.5 cm a 6 cm. La relación matriz/clasto está en proporción de 75 : 25.

**Unidad D (U-D)** Material matriz soportado, limo arenoso de color marrón oscuro, contiene clastos blandos milimétricos de color rojo dispersos, estos provienen de la erosión de la unidad A, además se hallan clastos de arenisca subangulosos de 3cm de diámetro en promedio. Esta unidad fue muestreada para datación por AMS C14.

**Unidad E (U-E)** Material matriz soportado, limo arenoso de coloración marrón oscuro a negro. Los clastos son de arenisca, de formas angulosas a subangulosas, su diámetro varía de 0.5 cm a 3 cm. La relación de clasto/matriz está en proporción de 1 : 9. Unidad muestreada para datación por AMS C14.

**Cuña coluvial IV (C-IV)** Material matriz soportado, limo arenoso de color marrón. Los clastos son de arenisca, de forma angulosa a subangulosa, su diámetro varía de 0.5 cm a 2 cm. La relación matriz/clasto está en proporción de 85 : 15. Unidad muestreada para datación por AMS C14.

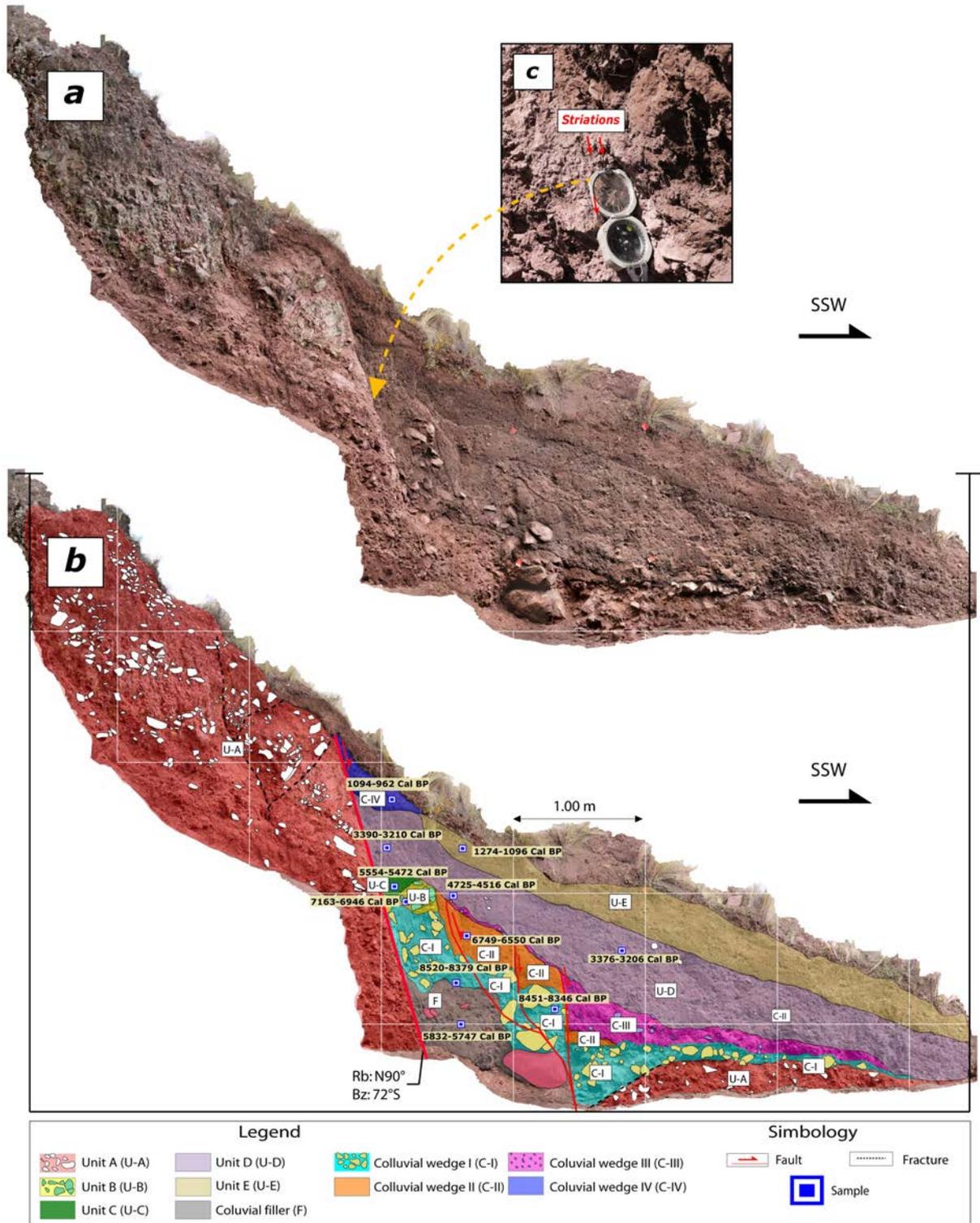


Figura 3:

#### 4.2. Interpretación paleosísmica

Las edades de radiocarbono de 11 muestras (Tabla1), la relación entre las secuencias estratigráficas y estructuras de deformación, proveen evidencia de múltiples eventos sísmicos ocurridos durante el Holoceno.

| Nº | Muestra   | Ubicación.<br>Estratigráfica | Edad<br>(Cal AD)         | Edad<br>(Cal BP)         | Edad<br>(S/Cal ) |
|----|-----------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|
| 1  | GA-50-036 | U-D                          | 1441-1261 Cal BC (95,4%) | 3390-3210 Cal BP (95,4%) | 3140 +/- 30 BP   |
| 2  | GA-50-037 | U-D                          | 1427-1257 Cal BC (92,8%) | 3376-3206 Cal BP (92,8%) | 3120 +/- 30 BP   |
| 3  | GA-50-038 | U-C                          | 3605-3523 Cal BC (53,1%) | 5554-5472 Cal BP (53,1%) | 4870 +/- 30 BP   |
| 4  | GA-50-039 | C-II                         | 4800-4601 Cal BC (95,4%) | 6749-6550 Cal BP (95,4%) | 5890 +/- 30 BP   |
| 5  | GA-50-040 | U-B                          | 5214-4997 Cal BC (95,4%) | 7163-6946 Cal BP (95,4%) | 6190 +/- 30 BP   |
| 6  | GA-50-041 | C-I                          | 6502-6397 Cal BC (95,4%) | 8451-8346 Cal BP (95,4%) | 7640 +/- 30 BP   |
| 7  | GA-50-042 | F                            | 3883-3798 Cal BC (49,7%) | 5832-5747 Cal BP (49,7%) | 5160 +/- 30 BP   |
| 8  | GA-50-043 | U-D                          | 2776-2567 Cal BC (70,9%) | 4725-4516 Cal BP (70,9%) | 4140 +/- 30 BP   |
| 9  | GA-50-044 | U-E                          | 676-860 Cal AD (95,4%)   | 1274-1090 Cal BP (95,4%) | 1310 +/- 30 BP   |
| 10 | GA-50-045 | C-IV                         | 856-988 Cal AD (88,9%)   | 1094-962 Cal BP (88,9%)  | 1190 +/- 30 BP   |
| 11 | GA-50-046 | C-I                          | 6571-6430 Cal BC (94,1%) | 8520-8379 Cal BP (94,1%) | 7680 +/- 30 BP   |

Tabla 1: Resultados de datación radiocarbónica por espectrometría de masas con aceleradores, para la reconstrucción se han utilizado las edades calibradas antes del presente (Cal BP-edades resaltadas de verde).

La evidencia paleosísmica está principalmente caracterizada por capas de sedimentos truncadas y cuñas coluviales derivadas de la erosión del escarpe de falla (Figura3).

De acuerdo a lo anterior, identificamos cuatro (04) eventos sísmicos claros (Figura4-A).

El primer evento, esta caracterizado por la actividad de la falla  $f_1$ , ésta desplaza el depósito de morrena (U-A), formandose a su vez la cuña coluvial (CI). La edad de la cuña coluvial (CI) es de ~8400 Cal BP y representa la edad cronológica mínima de este evento. La actividad de esta falla antes de los 8400 años no es visible en la trinchera, sin embargo al menos un evento mas habría desplazado la U-A. Sobreyaciendo a la cuña coluvial CI, se tiene el depósito U-B de edad ~7000 Cal BP.

El segundo evento, esta principalmente caracterizado por la actividad de la falla  $f_2$ , generando desplazamiento de los depósitos de morrenas y la cuña coluvial CI, la erosión de los escarpes generó la cuña coluvial CII de edad ~6600 Cal BP, sobre este se tiene la depositación de la U-C.

El tercer evento sucede posterior a un proceso de erosión, esta caracterizado principalmente por la actividad de la fallas  $f_4$ ,  $f_3$  y  $f_2$ , que en conjunto generan una estructura en flor negativa, a su vez es reactivada la falla  $f_1$ ; la erosión de los escarpes forman la cuña coluvial CIII. Suprayaciendo a lo descrito, se tiene la depositación de los niveles estratigráficos U-D y U-E.

EL cuarto evento, esta caracterizado por la reactivación de la falla  $f_1$ , la erosión del nuevo escarpe forma la cuña coluvial CIV de edad ~1000 Cal BP. Finalmente se tiene la última capa de suelo, en la configuración actual.

### 4.3. Estimación de paleomagnitudes

El desplazamiento y la longitud de ruptura superficial están fuertemente relacionados con la magnitud de paleoterremotos (Wells and Coppersmith, 1994). Basados en la publicación de parámetros de un gran número de terremotos conocidos en el mundo, algunas ecuaciones empíricas entre el máximo desplazamiento, desplazamiento promedio y magnitud momento fueron establecidas para fallas normales, los datos calculados para los cuatro eventos identificados se muestran en la (Tabla 2).

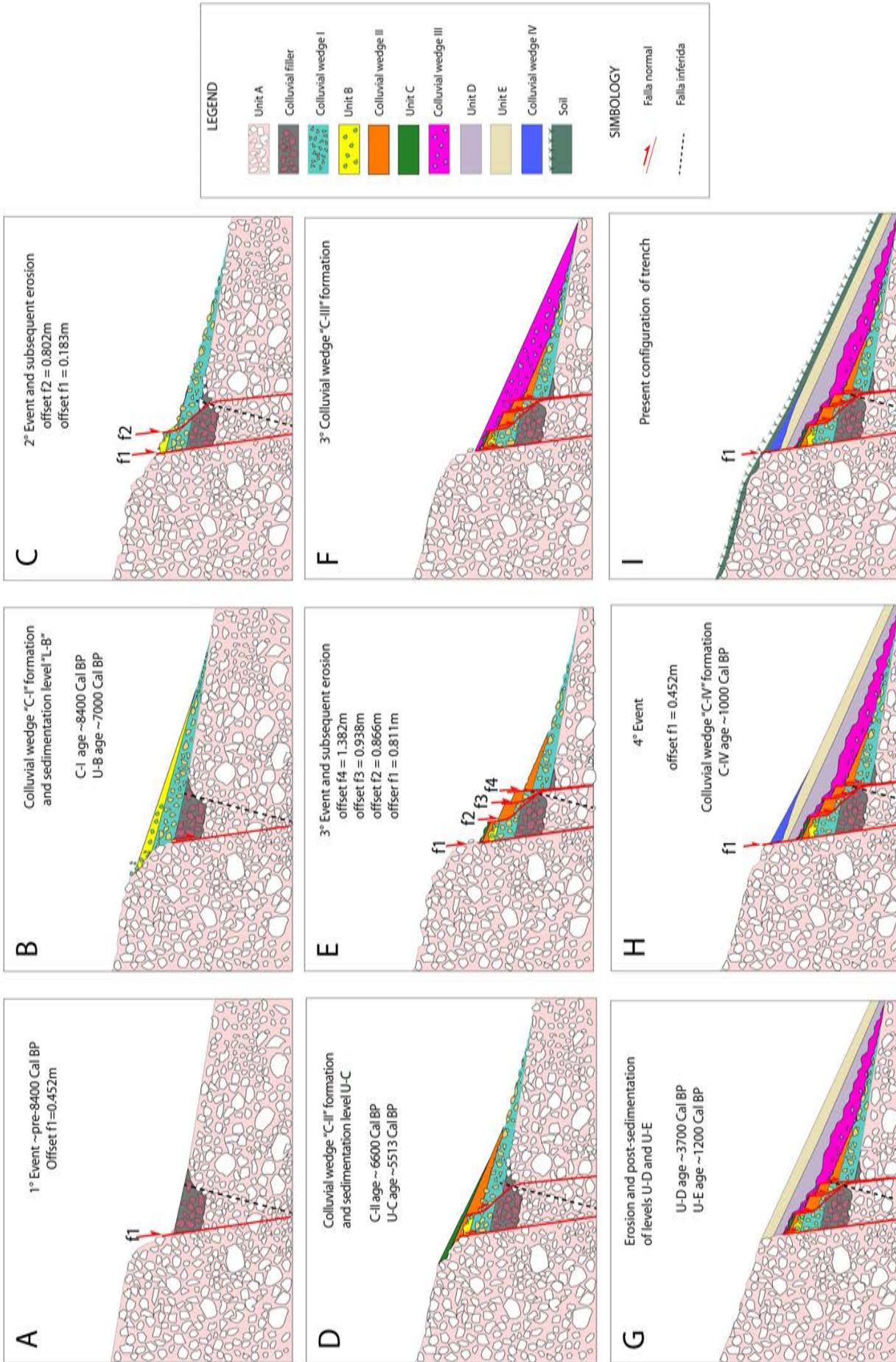


Figura 4: Secciones transversales simplificadas que muestran el desarrollo secuencial de la pared Este de la trinchera, extremo oeste de la Falla Tambomachay.

| Event | AD (m) | Mw    |
|-------|--------|-------|
| 1     | 0.425  | 6.538 |
| 2     | 0.754  | 6.700 |
| 3     | 1.299  | 6.854 |
| 4     | 0.425  | 6.538 |

Tabla 2: La primera columna muestra los eventos sísmicos determinados a partir de la reconstrucción e interpretación de la trinchera, la segunda columna muestra los valores de desplazamiento (AD) correspondientes a cada evento, y la tercera columna muestra el cálculo de la magnitud momento (Mw) para cada evento, a partir del valor de los desplazamientos.

#### 4.4. Intervalo de recurrencia

Calculamos el intervalo de recurrencia de los paleo terremotos holocenos con ruptura superficial (Tabla ??), cabe resaltar que estas representan la edad mínima de cada evento.

La cuña coluvial I tiene una edad de ~8400 Cal BP, la cuña coluvial II ~6600 Cal BP, y la cuña coluvial IV ~1000 Cal BP; entonces el intervalo de tiempo entre los eventos 1 y 2 es de ~1800 años, y el tiempo transcurrido entre el evento 2 y 4 es de ~5600 años, pero teniendo en cuenta el tercer evento que no se encuentra datado, estimamos un intervalo de recurrencia entre los eventos 2,3 y 4, que sería equivalente a ~2800 años.

#### 4.5. Tasas de desplazamiento

Calculamos las tasas de desplazamiento, para cada evento sísmico, considerando las edades de los sedimentos depositados antes de cada evento (Tabla ??), y estimamos un slip rate a partir de los 4m de desplazamiento acumulado en la morrena lateral de 14000 años (Carlos Benavente, 2018)

Para el primer evento se hace una excepción ya que no se tiene la edad del material desplazado, consideramos la edad de la cuña coluvial I, y calculamos un slip rate de ~0.35 mm/año.

Para el segundo evento consideramos la edad de la unidad B, y calculamos un slip rate de 0.35 mm/año.

Para el tercer evento consideramos la edad de la unidad C, y calculamos un slip rate de 0.31 mm/año.

Para el cuarto evento consideramos la edad de la unidad E, y calculamos un slip rate de 0.35 mm/año.

Para los eventos no visibles en la trinchera , calculamos un slip rate de 0.286 mm/año.

## 5. Discusiones y Conclusiones

Identificamos 4 paleoterremotos durante los últimos 8400 años, de la evidencia estratigráfica y morfológica. El primer evento de Mw 6.5 tiene una edad mínima de ~8400 Cal BP y generó un desplazamiento de 0.452 m. El segundo evento de Mw 6.7 tiene una edad máxima de ~7000 Cal BP y generó un desplazamiento de 0.802 m. El tercer evento de Mw 6.9 tiene una edad máxima de ~5513 Cal BP y generó un desplazamiento de 1.382 m. El cuarto evento de Mw 6.5 tiene una edad máxima de ~1200 Cal BP, y generó un desplazamiento de 0.452 m.

Cabrera et al. en 1988, estima un intervalo de recurrencia de 5000 años, nosotros constreñimos el valor de recurrencia, estimando un valor mínimo de ~1800 años y un valor máximo de ~2800 años.

Por primera vez calculamos tasas de desplazamiento para la falla Tambomachay, siendo el máximo de 0.35 mm/año y el mínimo de 0.286 mm/año, este resultado permite clasificar a la falla Tambomachay como una falla lenta con moderada actividad (Slemmons, 1977).

La falla Tambomachay generó terremotos de Mw 6.5 a 6.9.

## Referencias

- Benavente, C., Delgado, F., Taipei, M., Audin, L., and Pari, W. (2013). Neotectónica y Peligro Sísmico en la Región Cusco. Boletín N° 55 Serie C, INGEMMET, Lima.Perú.
- Cabrera, J. (1988). *NEOTECTONIQUE ET SISMOTECTONIQUE DANS LA CORDILLERE ANDINE AU NIVEAU DU CHANGEMENT DE GEOMETRIE DE LA SUBDUCTION: LA REGION DE CUZCO (PEROU)*. PhD thesis.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., and Carlier, G. (2011). BOLETIN 138A GEOLOGÍA DEL CUADRANGULO DE CUSCO HOJA 28-s, ESC. 1:50,000. Boletín 138, INGEMMET, Lima.Perú.
- Gregory, H. E. (1916). Geologic Reconnaissance of the Cuzco Valley, Peru. *American Journal of Science*, XLI(241).
- Mercier, J. L., Sébrier, M., Lavenu, A., Cabrera, J., Bellier, O., Dumont, J.-F., and Machare, J. (1992). Changes in the Tectonic Regime Above a Subduction Zone of Andean Type The Andes of Peru and Bolivia Durng the Pliocene-Pleistocene. 97.
- Sébrier, M., Mercier, J. L., Mégard, F., Laubacher, G., and Carey-Gailhardis, E. (1985). QUATERNARY NORMAL AND REVERSE FAULTING AND THE STATE OF STRESS IN THE CENTRAL ANDES OF SOUTH PERU.
- Silgado, E. (1978). HISTORIA DE LOS SISMOS MAS NOTABLES OCURRIDOS EN EL PERU (1513 - 1974). Technical Report 3, Instituto de Geología y Minería.
- Slemmons, D. (1977). FAULTS AND EARTHQUAKE MAGNITUDE. Technical report.
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4):974–1002.