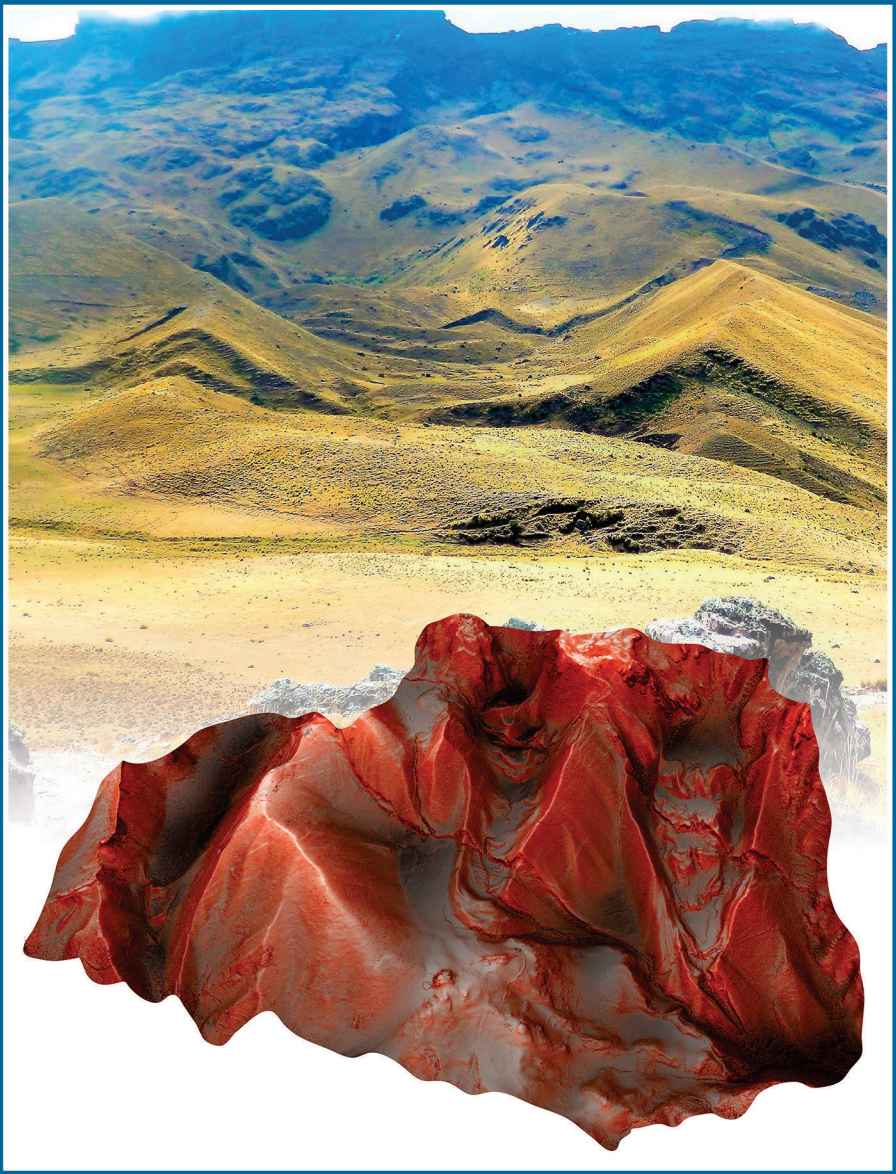
SECTOR ENERGÍA Y MINAS
INGEMMET
INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO

INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica
N° 83



Caracterización morfoestructural y paleosismológica del sistema de fallas Pachatusan - Cusco

Lima, Perú
2021

INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica
N° 83

Caracterización morfoestructural y paleosismológica del sistema de fallas Pachatusan - Cusco

Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico

Equipo de Investigación:

Anderson Palomino Tacuri
Carlos Benavente Escobar
Lorena Rosell Guevara
Enoch Aguirre Alegre
Briant García Fernández Baca
Edu Taipe Maquerhua

Lima, Perú
2021

INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica
N° 83

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2021-XXXXX
Nombre del autor(es). "Esta es una obra colectiva"

Razón Social: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)
Domicilio: Av. Canadá N° 1470, San Borja, Lima, Perú
Primera Edición, INGEMMET 2021
Se terminó de imprimir el xx de julio 2021 en los talleres del INGEMMET

Tiraje: 25

© **INGEMMET**

Presidente Ejecutivo: Víctor Manuel Díaz Yosa.

Gerente General: Luis Panizo Uriarte.

Comité Editor: Lionel Fídel Smoll, Yorri Carrasco Pinares.

Dirección encargada del estudio

Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico: Lionel Fídel Smoll.

Unidad encargada de edición

Unidad de Relaciones Institucionales: Yorri Carrasco Pinares.

Revisión Técnica: Mirian Mamani Huisa, Luis Albinez Baca.

Revisor Externo: Iván Santos Paredes.

Corrección gramatical y de estilo: Rafael Campos García Calderón.

Diagramación: Zoila Solis Yzaguirre.

Fotografía de la carátula: En fotografía de la parte superior se observa el escarpe de falla normal en un depósito glaciar (morrena) afectado por el Sistema de fallas Pachatusan. En la parte inferior un modelo de elevación digital de resolución 12 cm/px obtenido a partir de vuelos de drone, esta muestra la misma estructura de la fotografía.

Referencia bibliográfica
Palomino, A.; Benavente, C.; Rosell, L.; Aguirre, E.; García, B. & Taipe, E. (2021) - Caracterización morfoestructural y paleosismológica del sistema de fallas Pachatusan - Cusco. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica,* 83, 146 p., 1 mapa.

Publicación disponible en libre acceso en el Repositorio Institucional del INGEMMET. La utilización, traducción y creación de obras derivadas de la presente publicación están autorizadas, a condición de que se cite la fuente original ya sea contenida en medio impreso o digital (https://repositorio.ingemmet.gob.pe).

Los términos empleados en esta publicación y la presentación de los datos que en ella aparecen, son de exclusiva responsabilidad del equipo de investigación.

Contenido

RESUMEN **5**

ABSTRACT **7**

CAPÍTULO I **9**
INTRODUCCIÓN 9
1.1 UBICACIÓN Y EXTENSIÓN 9
1.2 ACCESIBILIDAD 9
1.3 ESTUDIOS ANTERIORES 10
1.4 OBJETIVOS 13
1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO 13
1.5.1 Etapa de gabinete I 13
1.5.2 Etapa de campo 13
1.5.3 Etapa de gabinete II 13

CAPÍTULO II **15**
CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO 15
2.1 INTRODUCCIÓN 15
2.2 GEOMORFOLOGÍA 15
2.2.1 Cordillera Oriental 15
2.2.2 Altiplano 16
2.3 ESTRATIGRAFÍA 16
2.3.1 Paleozoico 16
2.3.2 Mesozoico 21
2.3.3 Cenozoico 21

CAPÍTULO III **25**
CONTEXTO NEOTECTÓNICO REGIONAL 25
3.1 SISTEMA DE FALLAS ZURITE, CUSCO, URCOS, SICUANI (SFZCUS) 25
3.1.1 Falla Zurite-Huarocondo 25
3.1.2 Falla Tambomachay 26
3.1.3 Falla Cusco 26
3.1.4 Falla Chinchero 26
3.1.5 Falla Qoricocha 26
3.1.6 Falla Tamboray 26
3.1.7 Sistema de Fallas Pachatusan (SFP) 27
3.1.8 Falla Urcos 28
3.1.9 Falla Paucarpata 28
3.1.10 Falla Amaru 28
3.1.11 Falla Antahuire 29
3.2 SISTEMA DE FALLAS CASACUNCA, ACOMAYO, LAGUI, LAYO(SFCALL) 29
3.3 SISTEMA DE FALLAS CHINCHAIPUJIO, PARURO, ACOMAYO(SFCPA) 30

CAPÍTULO IV **33**
ANÁLISIS MORFOTECTÓNICO 33
4.1 INTRODUCCIÓN 33
4.2 METODOLOGÍA 33
4.2.1 Sensores remotos 33
4.2.2 Cartografiado morfoestructural 37
4.2.3 Cuantificación de desplazamientos 40
4.3 RESULTADOS Y CONCLUSIONES 45
4.3.1 Evidencia de deformación por falla 46
4.3.2 Cuantificación de la deformación 47
4.3.3 Estilo de deformación 65
4.3.4 Modelo Geodinámico 66

CAPÍTULO V **69**
ANÁLISIS PALEOSISMOLÓGICO 69
5.1 INTRODUCCIÓN 69
5.2 METODOLOGÍA 70
5.2.1 Selección de la zona 70
5.2.2 Logística 70
5.2.3 Excavación y preparación 70
5.2.4 Registro y muestreo 72
5.2.5 Datación de muestras 72
5.2.6 Construcción de orto mosaico 72
5.2.7 Reconstrucción estratigráfica 74
5.2.8 Cronología de eventos 74
5.2.9 Cálculo de paleomagnitudes 74
5.2.10 Cálculo del intervalo de recurrencia 74
5.3 RESULTADOS 75
5.3.1 Dataciones por Radiocarbono AMS C14 75
5.3.2 Descripción Estratigráfica de la trinchera Pachatusan 75
5.3.3 Deformación e interpretación paleo sismológica 79
5.3.4 Cálculo de paleo magnitudes 84
5.3.5 Magnitud máxima posible 84
5.3.6 Intervalo de recurrencia 85

CAPÍTULO VI **91**
CONCLUSIONES 91

BIBLIOGRAFÍA **93**

ANEXOS **97**
ANEXO I : GLOSARIO 101
ANEXO II : PERFILES SWATH 105
ANEXO III : TABLAS DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL Y HORIZONTAL 131

RELACIÓN DE MAPAS E ILUSTRACIONES **137**

RESUMEN

El Sistema de Fallas Pachatusan está localizado 5 km al este de la ciudad del Cusco. Se presenta como segmentos sub paralelos, distribuidos a lo largo de 25 km en un ancho de 2 km. Afecta a depósitos y geoformas de origen glacial, así como a rocas volcánicas (0.5 Ma). Estudios anteriores, como los de Benavente *et al*. (2013) y Sébrier *et al*. (1985), describen morrenas y geomorfologías asociadas a procesos glaciares afectados por fallas normales.

En este trabajo, se utilizaron modelos de elevación digital DEM de 5 cm/px, procesados a partir de fotografías tomadas con drones, también se utilizaron imágenes *Pleidades* para obtener un DEM de 1 m/px. El detalle de estos productos ayudó a analizar las características morfoestructurales del terreno. Adicionalmente, se excavó una trinchera paleo sismológica donde se realizó una descripción estratigráfica detallada y, con ayuda de dataciones por radiocarbono C14, se pudo reconstruir la deformación asociada al Sistema de Fallas Pachatusan.

El análisis morfoestructural de 201 perfiles Swath, sobre morrenas de 14k años, ayudó a identificar desplazamientos verticales de hasta 20 m correspondientes al componente normal de la falla, como también desplazamientos horizontales de hasta 19 m de componente sinestral. Además, estos resultados, junto al cartografiado morfoestructural detallado, permitieron proponer un modelo cinemático del Sistema de Fallas Pachatusan, con desplazamientos verticales y horizontales acumulados en trazos de falla, continuos, en los flancos SE y NO, mientras que, en la zona central la deformación se distribuye en trazos de falla discontinuos.

El análisis paleo sismológico de una trinchera de 8 m de largo y 3 m de alto permitió identificar 4 reactivaciones en los últimos 4000 años con intervalos de recurrencia de 1000 años. El último evento registrado está datado sobre un nivel palustre, desplazado 15.7 cm, nosotros proponemos que este evento está asociado al sismo de 1950, que produjo serios daños en la ciudad del Cusco (Silgado, 1978). Utilizamos la fórmula de Wells and Coppersmith (1994) para calcular una magnitud de 6.3 M para este evento.

ABSTRACT

The Pachatusan fault system is located 5 km east of Cusco. It is presented as sub parallel segments, distributed along 25 km in a width of 2 km. Also, it affects deposits and geoforms of glacial origin, as well as volcanic rocks (0.5 Ma). Previous studies by Benavente et al. (2013) and Sébrier et al. (1985) describe moraines and geomorphologies associated with glacial processes, affected by normal faults.

In this work, we used digital elevation models DEMs of 5 cm/px, processed from photographs taken with Drones, also, Pleidades images were used to obtain a DEM of 1 m/px. The detail of these products helped to analyze the morphostructural characteristics of the terrain. Additionally, a paleoseismological trench was excavated where a detailed stratigraphic description was made. Thus, with the help of C14 radiocarbon dating, it was possible to reconstruct the deformation associated with the Pachatusan fault system.

The morphostructural analysis of 201 Swath profiles on 14k year moraines helped to identify vertical displacements of up to 20m corresponding to the normal component of the fault, as well as horizontal displacements of up to 19m of sinistral component. In addition, these results together with the detailed morphostructural mapping, allowed us to propose a kinematic model of the Pachatusan fault system. Thus, there were vertical and horizontal displacements accumulated in continuous fault traces on the SE and NW flanks, while in the central zone the deformation is distributed in discontinuous fault traces.

The paleoseismological analysis of a trench 8 meters long and 3 meters high, identified 4 reactivations in the last 4000 years, with recurrence intervals of 1000 years. The last recorded event is dated on a plaustrine level, displaced 15.7 cm, we propose that this event is associated with the 1950 earthquake, which caused serious damage in the city of Cusco (Silgado, 1978). We use the Wells and Coppersmith formula (1994) in order to calculate a magnitude of 6.3M for this event.

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

En el sur del Perú, entre la Cordillera Oriental y el Altiplano, se observa una extensa zona de deformación generada por un cambio de esfuerzos durante el Plioceno hasta la actualidad (Sébrier *et al*., 1985). Se presentan bloques deformados limitados por fallas geológicas activas; parte de estas estructuras se exhiben adyacentes a la ciudad del Cusco.

El registro histórico muestra que la región del Cusco ha sido altamente afectada por la ocurrencia de sismos; dentro de los que destacan los terremotos de 1650, 1950 y 1986 (Cabrera, 1988; Ericksen, 1954; Silgado, 1978). Lo que pone en evidencia la actividad tectónica cuaternaria, que en superficie se representa como escarpes de falla que cortan depósitos cuaternarios y holocénicos. Como se observa en nuestra zona de estudio ubicada en el departamento de Cusco, a 5km al este de la ciudad del mismo nombre.

Algunos trabajos de investigación, como el de Cabrera (1988), describen el Sistema de Fallas Pachatusan mediante un conjunto de fallas normales, mientras que Benavente *et al*.. (2013) recientemente realizaron su cartografiado, identificando la cinemática de estas fallas.

Sin embargo, no existen estudios previos de cuantificación morfométrica y análisis paleo sismológico detallado que les permita conocer las tasas de desplazamiento, el intervalo de recurrencia y las magnitudes.

De esta manera, hemos realizado un detallado trabajo de morfometría, utilizando modelos de elevación digital de alta precisión, sobre los que se cuantificaron los desplazamientos con la ayuda de perfiles Swath. Por otro lado, realizamos el análisis paleo sismológico en una trinchera excavada transversalmente a un trazo de falla, donde, en base al análisis estratigráfico, observamos facies deformadas por acción de fallas datadas con C14. Estos estudios se realizaron con el objeto de conocer la cinemática real del Sistema de Fallas Pachatusan, conocer los intervalos de recurrencia, calcular la tasa de desplazamiento, así como calcular las paleo magnitudes y la magnitud máxima posible. Esta información contribuirá al correcto análisis del peligro sísmico, y, en consecuencia, en el plan de ordenamiento territorial de toda la región del Cusco.

1.1 UBICACIÓN Y EXTENSIÓN

La zona de estudio está ubicada en el departamento del Cusco, en el límite entre la Cordillera Oriental y el Altiplano, a 5 km al este de la ciudad del Cusco, y abarca las siguientes provincias: Huacarpay, Oropesa, Saylla, San Jerónimo y parte del distrito de San Sebastián.

Geomorfológicamente, está limitada de N-S por los ríos Vilcanota y Huatanay, bajo las faldas de la montaña Pachatusan.

Cubre un área total de 197 000 km^2, delimitadas por las coordenadas:

1.2 ACCESIBILIDAD

Tabla 1.1

Límites de la zona de estudio en coordenadas geográficas

Longitud	Latitud
71º55'O	13º40'S
71º39'O	13º40'S
71º55'O	13º27'S
71º39'O	13º27'S

Las rutas de acceso a las zonas de estudio se presentan como vías asfaltadas, trochas afirmadas y trochas semiafirmadas. Asimismo, el relieve suave en las zonas de estudio permite generar con facilidad accesos improvisados con un vehículo de doble tracción. A continuación, se describe cada una de ellas.

El acceso al sector norte de la zona de estudio se inicia en la plaza principal del distrito de San Jerónimo. A partir de allí, se toma la ruta hacia el Centro Poblado de Huacoto; 2.5 km antes de llegar a él, se toma el desvío a la derecha. Esta vía se presenta como trocha afirmada y se dirige al sector norte de la zona en estudio. Se estima aproximadamente una hora de viaje desde el punto de partida.

El acceso al sector central de la zona en estudio también se inicia en la plaza principal del distrito de San Jerónimo con dirección al centro poblado de Huacoto. Se bordean las canteras de Rumicolca y se continúa con dirección norte. Se estima aproximadamente 1h 15 m de viaje.

El acceso al sector sur de la zona en estudio se inicia en el poblado de Tipón. Se toma la vía principal asfaltada que se dirige al centro arqueológico de Tipón, para luego tomar el único desvío a la derecha. Esta vía se presenta como trocha afirmada y se dirige a la zona de estudio. Se estima 1 hora de viaje.

1.3 ESTUDIOS ANTERIORES

En 1954, Ericksen llevó a cabo una recopilación de los eventos sísmicos ocurridos en Cusco desde el siglo XVII al siglo XX en su libro *The Cusco, Perú, Earthquake of Mai 21, 1950*. En él, describe los daños, pérdidas materiales y vidas humanas, en los diferentes poblados de la región del Cusco que este fenómeno trajo consigo, aunque sin establecer la falla o fallas geológicas que generaron estos movimientos.

Además, estudia los efectos post sísmicos del sismo de 6 de magnitud en 1950, el cual se generó probablemente a una profundidad de 8 a 9 km, que se sintió en un área de 16 a 15 km^2, durante el sismo se derrumbó gran parte de las construcciones afectadas por el sismo de 1941, este terremoto probablemente fue de origen tectónico.

En 1985, Sébrier, en *Quaternary normal and reverse faulting*, indicaba que los Andes se encuentran bajo un régimen de extensión con tendencia N-S, limitada por la placa convergente de Nazca y la placa Sudamericana, ambas vinculadas mediante un régimen de acortamiento E-O.

Asimismo, describe un régimen extensivo N-S posterior a la deformación compresional del Plioceno Temprano. Es así como se observan fallamientos normales con longitudes de 5 a 20 km que afectan el basamento rocoso y los depósitos cuaternarios.

Por otro lado, describe a la Cuenca del Cusco como una pequeña cuenca interandina rellenada parcialmente por sedimentos cuaternarios, localizada entre la Cordillera Oriental y las mesetas altas, la que parece estar caracterizada por una extensión N-S.

En 1988, Cabrera *et.al*., en *Neotectonique et sismotectonique dans la cordillere andine au niveau du changement de geometrie de la subduction: la region de Cuzco (Pérou)*, en lo que respecta al Sistema de Fallas Pachatusan, indicrona que los escarpes de falla bien conservados afectan morrenas de 14,000 años, datados según correlaciones con el paisaje glaciar de la Cordillera de Vilcanota-Ausangate y el Casquete glaciar de Quelcaya (Gregory, 1916; Cabrera *et al*., 1987), por consiguiente, estas indican actividad tectónica durante el Holoceno.

Por otro lado, los escarpes en el Sistema de Fallas Pachatusan, visualizados en las fotografías aéreas de 1956, han permitido sugerir a Cabrera *et al*. (1987) que estas se habrían formado durante el terremoto de 1950, aunque sin llegar a demostrar esta hipótesis.

En 1992, Mercier *et al*., en *Changes in the tectonic regime above a subduction zone of andean type: the Andes of Perú and Bolivia during the pliocene-pleistocene*", indicaron una fase de extensión N-S evidenciada en fallas activas y holocenas. Asimismo, mostraron evidencias de fallas que cortan depósitos pleistocenos, así como análisis de dos tipos de familias de estrías: uno reciente, que sería producto de la extensión N-S; y uno mayor, que envuelve fallas inversas producto de una compresión E-O o N-S. Asimismo, las fallas que afectan formaciones Pliocenas muestran una familia de estriaciones producto de una extensión NE-SO o E-O.

En 1998, Cabrera *et al*., en "*Surface ruptur associated with a 3.5 mb earthquake: the 5 de april 1986. Cuzco earthquake and kinematics of the Chincheros-Qoricocha faults of the Higs Andes, Perú*", describen las características de ruptura superficial durante el sismo de Qoricocha en 1986, e indican el comportamiento cinemático de la falla Qoricocha antes y durante el sismo mediante estudios de micro tectónica.

El sismo de Qoricocha (1986) tuvo una magnitud 5.3 Mb (USGS), generó una ruptura superficial de aproximadamente 10 cm y abarcó una longitud de 3 km, Las rupturas superficiales observadas generalmente corresponden a sismos de magnitudes de 6 Mb o más.

En este artículo, se sostiene que las rupturas superficiales generadas durante el sismo del 5 de abril de 1986 corresponden a un caso excepcional de ruptura superficial, además de ser el segundo ejemplo histórico de ruptura superficial de tipo normal, observado en los Andes después del terremoto de Quiches (1946), pueblo ubicado en la Cordillera Blanca.

En 2013, Benavente, Delgado *et al*., en el Boletín n° 55 serie c: "Neotectónico y peligro sísmico en la región del Cusco", describen las características morfo tectónicas del Sistema de Fallas Pachatusan y muestran desplazamientos sinestrales, dextrales, normales e inversos. El cartografiado a detalle muestra segmentos de falla discontinuos y paralelos que abarcan un área de 21 km de largo con 3.5 km de ancho con una dirección promedio de N130º sobre altitudes de 4100 y 4300 m s. n. m. Además, indican que estas fallas están relacionadas a compensaciones topográficas correlacionadas con cadenas de exhumación, o simplemente dispuestas de manera paralela a la dirección del máximo esfuerzo horizontal. También muestran evidencias de escarpes frescos recientes que podrían estar

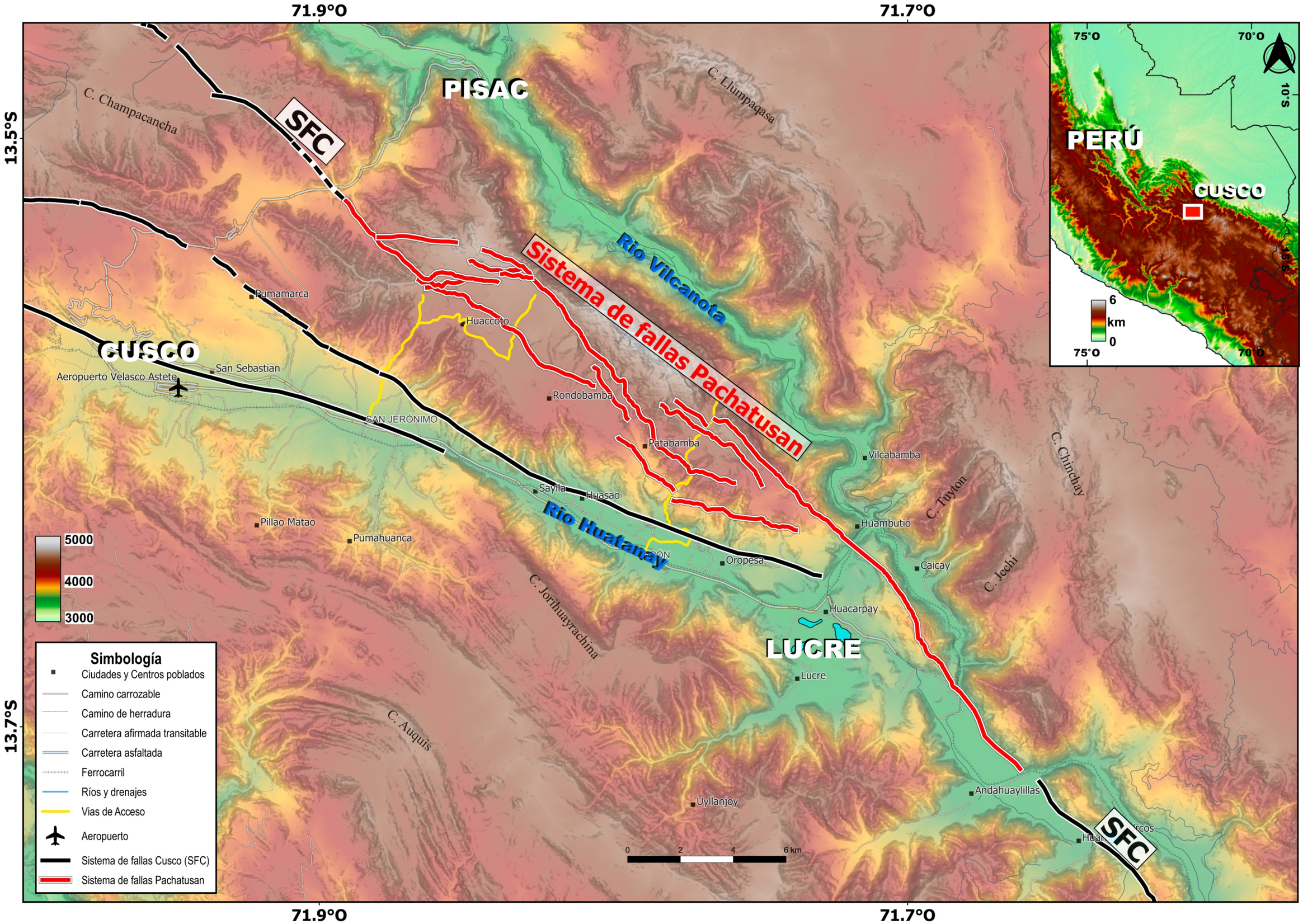


Figura 1.1 Mapa de ubicación y accesibilidad de la zona de estudio (elaboración propia); cartografiado del Sistema de Fallas Cusco en líneas de color negro

relacionados al terremoto de 1950 y no a la Falla Tambomachay, como sugieren otros investigadores.

1.4 OBJETIVOS

- Identificar los rasgos morfo estructurales del Sistema de Fallas Pachatusan
- Cuantificar la deformación
- Realizar el análisis paleo sismológico del Sistema de Fallas Pachatusan
- Determinar el potencial sísmico del Sistema de Fallas Pachatusan
- Determinar la ocurrencia de sismos pasados asociados al Sistema de Fallas Pachatusan

1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para llevar a cabo el presente estudio, se realizó el análisis neotectónico y morfo tectónico del Sistema de Fallas Pachatusan, que requirió la programación de salidas al campo y trabajos en gabinete en tres etapas, como se describe a continuación:

1.5.1 Etapa de gabinete I

- Recopilación y revisión de información bibliográfica
- Recopilación de datos previos en la zona de estudio
- Foto interpretación sobre datos obtenidos por sensores remotos y fotografías aéreas de 1956
- Cartografiado morfo estructural de depósitos cuaternarios afectados por fallas, como depósitos de morrenas, sagpond, lacustres, palustres, conos aluviales, fluvioglaciares y drenajes
- Definición de rutas de acceso para la etapa de campo
- Definición de la ubicación para la toma de puntos de control con GPS Diferencial
- Determinación de áreas específicas para vuelos con drones

1.5.2 Etapa de campo

- Reconocimiento de la zona de estudio
- Determinación de sectores específicos para toma de datos
- Colocación de puntos de control para trabajos de fotogrametría
- Sobrevuelo con *drone* para la toma de fotografías
- Cartografiado geológico-estructural de depósitos cuaternarios afectados por falla para hallar la tasa de desplazamiento
- Elaboración de trinchera paleo sismológica en depósitos cuaternarios
- Toma de muestras de materia orgánica para dataciones
- Identificación de zonas vulnerables ante un evento sísmico

1.5.3 Etapa de gabinete II

- Análisis de información recabada en campo
- Procesamiento de fotografías aéreas tomadas por *drone* para la generación de DEM a partir de un orto mosaico
- Generación de perfiles *swath* sobre DEM para la cuantificación del desplazamiento
- Análisis de dataciones y descripción de las trincheras paleo sismológicas
- Generación de mapa geológico-estructural
- Redacción de boletín

CAPÍTULO II
CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO

2.1 INTRODUCCIÓN

La geomorfología de la región del Cusco está caracterizada por la asimetría del relieve y la gran variación en la elevación, modelada por factores climáticos, tectónicos y geológicos.

Regionalmente, la zona de estudio forma parte de la cordillera Oriental, en el límite con el Altiplano, que, a su vez, está constituida de montañas, depresiones, altiplanicies y valles.

Localmente, se observan unidades geomorfológicas propias de un ambiente glacial, en el que podemos observar un extenso paisaje con morrenas glaciares emplazadas, modeladas por procesos tectónicos.

2.2 GEOMORFOLOGÍA

2.2.1 Cordillera Oriental

La Cordillera Oriental presenta un relieve heterogéneo abrupto, con picos elevados que varían de 4000 a 5000 m s. n. m.; asimismo, presenta depresiones, mesetas y valles con altitudes de entre 2900 y 3500 m s. n. m.

Los picos más altos están conformados por afloramientos de rocas silúrico-devonianas, mientras que, en los valles y depresiones, se encuentran presentes los depósitos cuaternarios. Se observan lomas de aspecto rugoso alineadas a los segmentos de fallas correspondientes a los emplazamientos volcánicos del Rumicolca. Por otro lado, localmente, se distinguen también subunidades geomorfológicas que describimos a continuación:

Montañas del Pachatusan

Las montañas del Pachatusan conforman gran parte de la zona en estudio. En esta unidad geomorfológica, se observan montañas cuyas altitudes varían de 4000 a 4500 m s. n. m. Afloran de rocas que van desde el Pérmico hasta depósitos cuaternarios. Estructuralmente, estas montañas forman parte del anticlinal del Vilcanota.

Esta unidad geomorfológica se encuentra disectada de NO-SE por el río Vilcanota. Hacia el norte, podemos observar laderas con pendiente suave, mientras que al sur la pendiente de ladera es más pronunciada. Entre estas laderas, se forma un valle extenso, donde se encuentran asentados los poblados de San Salvador, Pisac, Taray, Coya, Lamay, Calca, Arin, Huaran, Huycho, Huayllabamba, Yucay, Urubamba, Ollantaytambo.

Montañas del Cusco

Esta unidad está conformada por montañas cuyas altitudes llegan hasta los 4300 m s. n. m. Están limitadas por el Altiplano en el sur y, de este a oeste, por la meseta de Huacoto y la depresión de Corao, respectivamente. Están constituidas de rocas paleógenas (Eocenas-Oligocenas), con morfologías de laderas, con pendiente pronunciada hacia el suroeste y drenajes con dirección NE-SO.

Meseta de Huacoto

Esta meseta se ubica entre dos unidades geomorfológicas: las montañas de Pachatusan y Cusco. Ambas unidades presentan una altura promedio de 4000 m s. n. m., y un relieve sub homogéneo de pendiente moderada. En esta meseta, observamos tanto emplazamientos volcánicos como segmentos de fallas que modelan esta unidad, además de depósitos cuaternarios de origen glacial, cuyos drenajes movilizan aguas hacia el valle del Cusco.

Depósitos glaciares

Los depósitos glaciares se extienden sobre la meseta de Huacoto, formando un paisaje de numerosos cuerpos morrénicos con diferentes tamaños. Estos depósitos son producto de las pulsaciones glaciares ocurridas hace 14 000 años en un contexto de retroceso glaciar. Se observan morrenas frontales que conservan su estructura a una altura promedio de 4050 m s. n. m., que representan las pulsaciones glaciares durante el Holoceno. También se observan morrenas laterales bien conservadas, así como morrenas frontales cortadas por canales a una altura que varía entre 3900 y 4000 m s. n. m., que muestran el último máximo avance glaciar de hace 14 000 años.

Depósitos periglaciares

Se observan depósitos cuaternarios producto de la influencia glacial. Se presentan como acumulación de rocas y sedimentos

alrededor de depósitos morrénicos. Estos depósitos peri glaciares abarcan una extensa área, pues se extienden sobre las montañas de Pachatusan, las montañas del Cusco y gran parte de la meseta de Huacoto.

Volcánicos de Rumicolca

A lo largo y ancho del Sistema de Fallas Pachatusan, se observan cuerpos volcánicos alineados y emplazados. En el área de estudio, podemos observar cuatro de estos cuerpos volcánicos, con un diámetro promedio de 2 km, que se presentan como lomas de textura rugosa con relieve agreste.

Meseta de Qoricocha

Se ubica al noroeste de la zona en estudio. El relieve de esta unidad es relativamente llano y se encuentra a una altura promedio de 4100 m s. n. m. La meseta de Qoricocha presenta una superficie modelada, producto de la actividad glacial, evidenciada por la presencia de depósitos morrénicos y fluvioglaciares. También se observan drenajes que movilizan aguas en dirección norte, hacia el valle del Vilcanota, así como una depresión pronunciada que alberga a la laguna del mismo nombre.

Depresión de Coraó

Esta unidad se encuentra limitada por las montañas del Cusco. Presenta un relieve llano con una altura promedio de 3600 m s. n. m., y alberga a los centros poblados de Coraó y Rayaniyoc. Se observa que, desde lo alto de las montañas del Cusco, los drenajes movilizan aguas hacia esta depresión, recibiendo aporte sedimentario que la rellena de material fluvio-aluvial.

Valle del Vilcanota

El valle del Vilcanota se presenta como la incisión de las montañas de Pachatusan. Este valle presenta altitudes que van de los 2900 a los 3100 m s. n. m., con una dirección NO-SE que varía, en el norte, a ONO-ESE. A lo largo de todo el valle, se pudo identificar hasta tres familias de terrazas, conformadas por sedimentos clásticos de origen fluvial.

2.2.2 Altiplano

El Altiplano presenta un relieve sub homogéneo con alturas que van de los 3800 a los 4000 m s. n. m. Asimismo, muestra montañas que pueden sobrepasar los 4400 m s. n. m., y drenajes que las disectan, dándoles una configuración agreste. Está conformado por rocas mesozoicas de poco espesor, comparadas con la Cordillera Oriental. Asimismo, presenta capas rojas continentales del Terciario que conforman la mayor parte del afloramiento en superficie. Esta unidad presenta otras subunidades geomorfológicas locales que se describen a continuación.

Meseta de Saqsaywaman

La meseta de Saqsaywaman se encuentra al norte de la ciudad del Cusco en el límite con la Cordillera Oriental. Presenta un relieve relativamente llano con altitudes que van de los 3600 a los 3700 m s. n. m. En esta meseta, afloran cuerpos discontinuos de caliza, lutita y yeso de la Formación Maras y Ayabacas. Esta mes*et al*berga al importante Centro Arqueológico de Saqsaywaman, así como su famoso Rodadero, entre otros centros arqueológicos.

Depresión del Cusco

La depresión del Cusco se presenta como un valle interandino donde discurre el rio Huatanay. Tiene forma de cuenca alargada con dirección NO-SE, una longitud de 30 km y una altura que varía entre los 3150 y los 3400 m s. n. m. Está rellenada por sedimentos de origen Lacustre-Palustre, flanqueados por conos aluviales. Se la describe como una cuenca tectónica, ya que está controlada por fallas activas. En el límite SE de esta cuenca, se observa la presencia de los volcánicos mono genéticos del Rumicolca. Formó un gran lago denominado Morkill en el Pliocuaternario (Gregory, 1916).

Montañas del Vilcaconga

Esta unidad se encuentra al sur de la depresión del Cusco con elevaciones entre los 3300 y los 4200 m s. n. m. Tiene un relieve abrupto con drenajes que incisan en dirección NE-SO. Se observan mayormente afloramientos de capas rojas pertenecientes al grupo San Jerónimo y a las formaciones Punacancha que se encuentran plegadas.

2.3 ESTRATIGRAFÍA

Las unidades lito estratigráficas en la zona de estudio tienen edades que van del Paleozoico inferior al Cuaternario, como se detalla a continuación:

2.3.1 Paleozoico

Las rocas del Paleozoico afloran principalmente al norte de la zona de estudio. Asimismo, se observan afloramientos paleozoicos en las laderas sur y norte del valle del Vilcanota.

Silúrico-Devónico

Se caracteriza por presentar rocas metamórficas que han sido agrupadas en dos formaciones: Ananea y Ccatca. La Formación Ananea aflora al norte y este de la zona en estudio. Está comprendida por pizarras y esquistos pizarrosos, de color gris

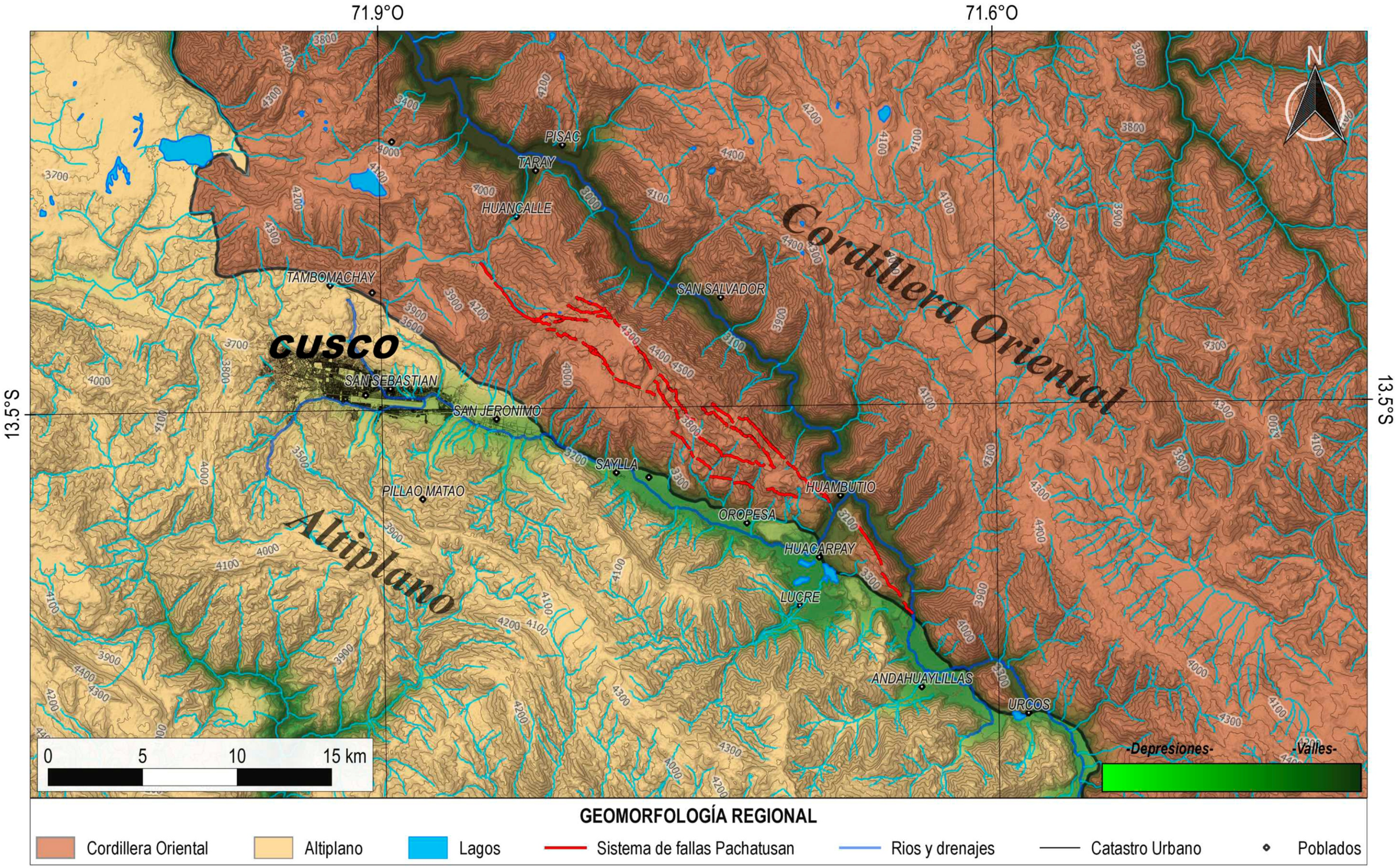


Figura 2.1 Mapa geomorfológico regional (elaboración propia)

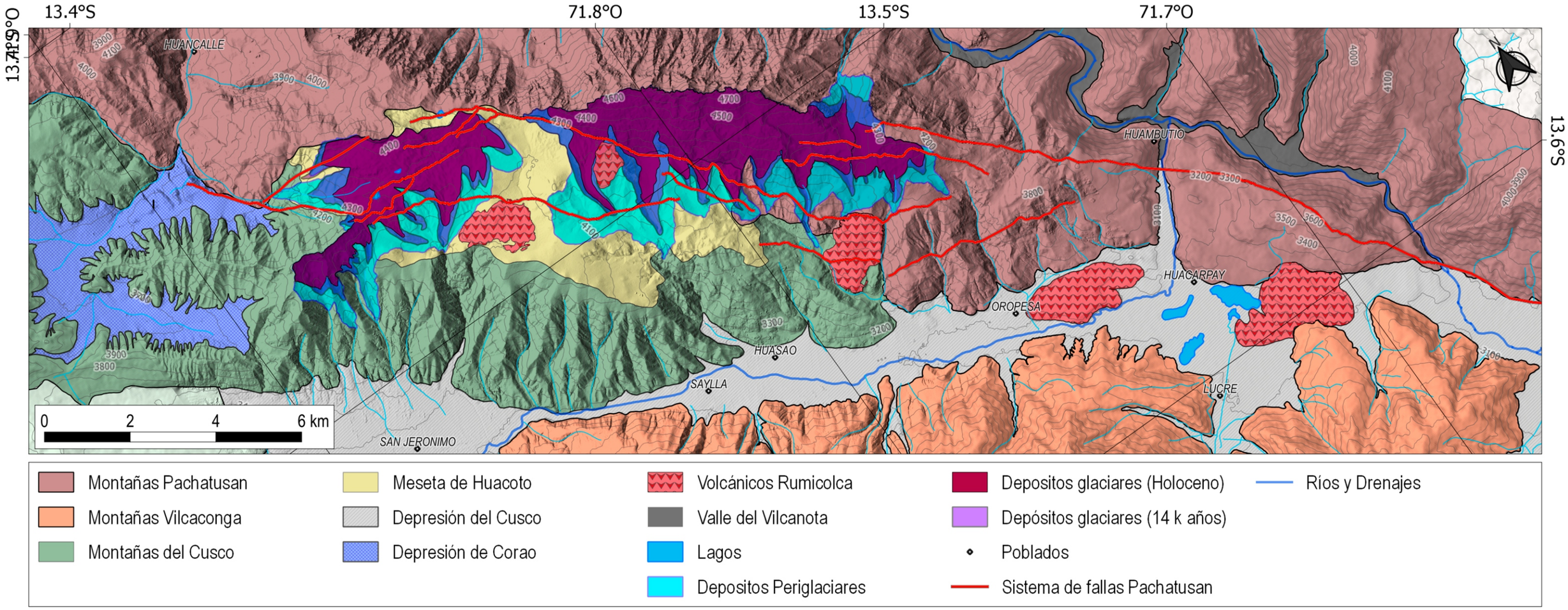


Figura 2.2 Mapa geomorfológico local (elaboración propia)

y negro, intercalados con escasos bancos de cuarcitas de 5 a 20 cm, de ambiente sílico-clástico somero distal. Su espesor aproximado es de 1500 m, debido probablemente a la repetición de secuencias influenciadas por la tectónica (Laubacher, 1978).

Hacia el este de la zona en estudio, se observan afloramientos de diamigtitas, pizarras y cuarcitas, con laminaciones *hummoky* de ambiente probablemente glaciomarino, con influencia de olas y tormentas, correspondientes a la Formación Ccatca. El paso de la formación Ananea a Ccatca es progresiva, por lo que se considera el espesor de esta última unidad a partir de los primeros niveles deslizados, es decir, un espesor de 500 m (Carlotto *et al*., 2004, 2003).

Permo-Triásico

Las rocas del Permo-Triásico afloran en el anticlinal del Vilcanota, donde está representado por el Grupo Copacabana y la Formación Ene. Hacia el norte de la zona de estudio, en las laderas bajas del valle del Vilcanota, está presente el Grupo Copacabana. El Grupo Copacabana está compuesto por calizas marinas de grano fino, así como por ooliticas onduladas, intercaladas con lutitas negras y carbonosas, fósiles silicificados de fusolinas, braquiopodos, corales, etc. En el anticlinal de Vilcanota, se le estima un espesor que varía entre 300 a más de 700 m (Newell and Chronic, 1953).

2.3.2 Mesozoico

Se observan afloramientos mesozoicos, presentes en la mayor parte de la zona de estudio, afectados por el Sistema de Fallas Pachatusan. Igualmente, se observan afloramientos en la margen derecha del rio Vilcanota.

Triásico-Jurásico

Los afloramientos triásico-jurásicos presentes en las montañas del Pachatusan pertenecen al denominado Grupo Mitu. A su vez, este grupo está dividido en dos formaciones: Formación Pisac y Formación Pachatusan.

La Formación Pisac aflora al norte de la zona de estudio. Está conformada por conglomerados de conos aluviales, intercalados con areniscas y limolitas rojas fluviales, intercaladas de coladas basálticas y, en el techo, de calizas. El espesor de esta unidad varía entre 200 y 400 m (Candia and Carlotto, 1985; Gabelman and Jordan, 1964).

La Formación Pachatusan aflora en las zonas más elevadas de las montañas de Pachatusan, al norte de la zona de estudio. Está formada por lavas, aglomerados y brechas volcánicas de basalto andesítico y riolitas de color rojo violáceo, con un espesor que varía entre 300 y 500 m (Candia and Carlotto, 1985; Gregory, 1916).

Cretácico

Aflora en gran parte de la zona de estudio. Los afloramientos triásico-jurásicos están en contacto con las secuencias poco potentes de la Formación Huambutio, a la que se le atribuye una edad kimmeridgiana-berriasiana, en el límite Jurásico Cretácico (Carlotto *et al*., 1991). Esta formación está compuesta de conglomerados de conos aluviales y areniscas fluviales de color rojo violáceo, además calizas y limonitas rojas basálticas (Carlotto, 1989; Carlotto *et al*., 1991).

Sobre la formación Huambutio, reposa en discordancia la Formación Huancané, correspondiente a ambientes de sedimentación fluvial en el miembro inferior y a niveles calcáreos locales en el miembro superior. Se describe también una segunda unidad de ambiente eólico y fluvial (Newell and Chronic, 1953).

En la zona Oriental, se observan afloramientos de origen continental y marino correspondientes al Grupo Yuncaypata, que, a la vez, alberga 4 formaciones. Se trata de la Formación Paucarbamba, que posee sedimentos de origen marino poco profundo (Carlotto *et al*., 1996); la Formación Maras, con afloramientos estratificados o caóticos de yesos y lutita; la Formación Ayabacas, conocida como las Calizas de Yuncaypata, formada de una plataforma carbonatada poco profunda (Cabrera and Petersen, 1936); y la Formación Puquín, constituida por calizas y lutitas de transgresión y regresión (Carlotto *et al*., 1992).

2.3.3 Cenozoico

Paleógeno

Al oeste de la zona de estudio, aflora la Formación Quilque, constituida por lutitas lacustres rojo moradas, areniscas y micro conglomerados, con clastos calcáreos medios fluviales y presencia de carofitas (Carlotto *et al*., 1992; Gregory, 1916). Se observan también afloramientos de lutitas y margas rojas con intercalaciones de yesos de medios lacustres y niveles fluviales en la parte superior, correspondiente a la Formación Chilca (Audebaud *et al*., 1973; Carlotto *et al*., 1991).

Al sur de la zona de estudio, se encuentra una serie roja potente, constituida por areniscas feldespáticas, con niveles de lutitas y conglomerados de origen fluvial, y con una potencia de 6000 m, denominada Grupo San Jerónimo, dividida en las formaciones Kayra y Soncco (Córdova, 1986).

Neógeno

Los afloramientos de roca correspondientes a esta edad están constituidos por brechas con matriz limo-arcillosa y reciben el nombre de Formación Chinchero. Las brechas clásticas de esta

formación provienen de las formaciones circundantes (Cabrera, 1988; Córdova *et al*., 1994).

Los cuerpos volcánicos que se observan en la zona de estudio se denominan Formación Rumicolca (Mendívil and Dávila, 1994). Se encuentran alineados al Sistema de Fallas Pachatusan y están compuestos principalmente de andesitas, dacitas y traquitas ricas en potasio, así como shoshonitas.

Cuaternario

La descripción de depósitos cuaternarios en la zona de estudio es importante, puesto que evidencia la deformación en superficie generada por el Sistema de Fallas Pachatusan. A continuación, se describen los depósitos cuaternarios.

La Formación San Sebastián aflora al sureste de la zona de estudio. Esta formación comprende secuencias fluviales de alta energía, como canales de arena grano decreciente y niveles de llanura de inundación que comprenden lutitas y arcillas (Gregory, 1916).

Los depósitos lacustres se evidencian tanto en los alrededores como en los lagos pequeños ubicados en la meseta de Huacoto. Estos depósitos están presentes también en la parte interna de morrenas. Asimismo, se observa un gran cuerpo de depósito lacustre en el humedal de Huacarpay.

Los depósitos glaciares se extienden a lo largo del sector noroeste y central de la zona de estudio. Estos depósitos están constituidos por sedimentos peri glaciares y morrenas que, a su vez, se clasifican como holocenas y del último mayor avance (~14000 años).

Los depósitos fluviales se forman en zonas circundantes a los ríos Vilcanota y Huatanay. Estos depósitos presentan una estructura interna de barras y canales compuestos por arena y grava.

Los Depósitos Aluviales están ubicados en la base de las quebradas a manera de conos aluviales. Estos depósitos están vinculados al transporte de detritos por las quebradas que fluyen sus aguas en los valles del Vilcanota y Huatanay.

Los Depósitos Coluviales se encuentran en toda la zona de estudio. Se presentan como la acumulación de derrubios en laderas, constituyen clastos angulosos, poco sorteados de origen sedimentario y volcánico.

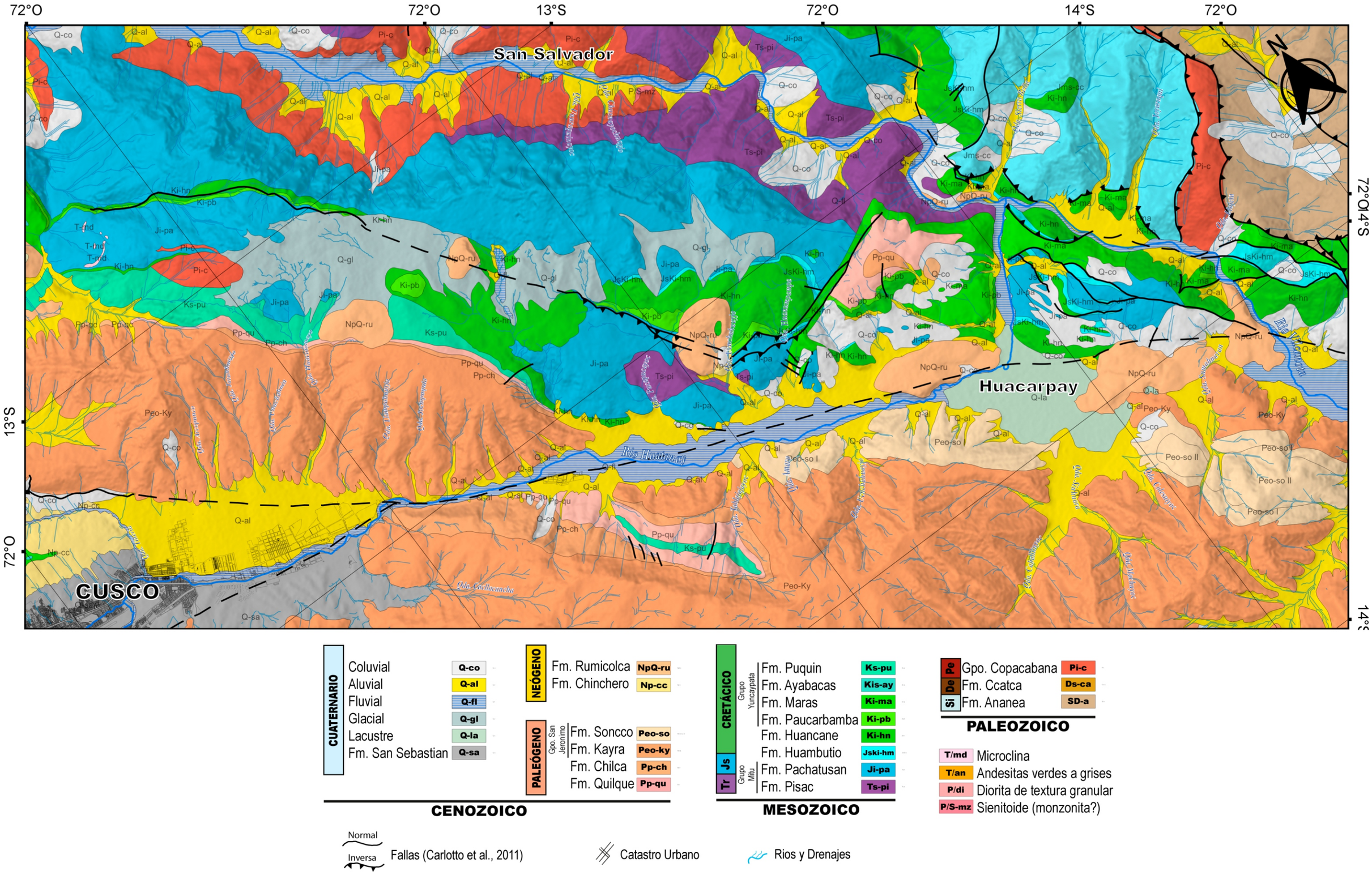


Figura 2.3 Mapa geológico (Carlotto *et al*., 2011)

CAPÍTULO III
CONTEXTO NEOTECTÓNICO REGIONAL

3.1 SISTEMA DE FALLAS ZURITE, CUSCO, URCOS, SICUANI (SFZCUS)

Este sistema de fallas abarca aproximadamente 220 km y posee una dirección aproximada N 140º. Este sistema de fallas presenta una deflexión en su prolongación norte; además, se observa que afecta a los depósitos cuaternarios, indicador de actividad reciente en los segmentos de este sistema de fallas (Benavente *et al*., 2013).

3.1.1 Falla Zurite-Huarocondo

Tiene una extensión de 55 km, con una dirección N 100° y N 115°, que se prolonga desde Abancay-Apurímac. Presenta escarpes degradados al oeste y mejor conservados al este (figura 3.1), con un desplazamiento acumulado de 100 m, producto de varios movimientos normales durante el Cuaternario (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.1 Las flechas de color rojo señalan el escarpe principal de la Falla Zurite-Huarocondo. Se aprecia un desnivel de la superficie de 100 m, así como escarpes con desniveles más pequeños (6 m), producto de la migración del plano de falla. Fotografía tomada hacia el noreste (Benavente *et al*., 2013)

3.1.2 Falla Tambomachay

Se extiende a lo largo de 20 km con dirección N 120º, paralela a la cuenca del Cusco, a unos 4 km al norte de la Ciudad. Esta falla corta depósitos cuaternarios y se le describe como una falla normal-sinestral con antecedente inverso y dextral. Gregory (1916), Cabrera and Sebrier (1998) y Marocco, (1977) mencionan escarpes de entre 2 y 20 metros (figura 3.2), probablemente holocenos, donde se observa el contacto entre basamento rocoso y depósitos aluviales. Paralela a esta falla, en el margen derecho de la cuenca del Cusco, se extiende la Falla Cusco.

Figura 3.2 Segmento central de la falla Tambomachay. Se observa un escarpe principal rectilíneo que afecta a depósitos cuaternarios de movimiento normal con componente sinestral. Fotografía tomada hacia el norte (Benavente *et al*., 2013).

3.1.3 Falla Cusco

Esta falla presenta una orientación noroeste-sureste y afecta a depósitos cuaternarios, por lo que se le asigna una edad vinculada al Pleistoceno Superior. En su prolongación norte, se pudo observar un escarpe de 5 m (Benavente *et al*., 2013).

3.1.4 Falla Chinchero

Ubicada a 8 km al norte de la Falla Tambomachay, se extiende a lo largo de 10 km en dirección este-oeste. Esta falla preserva escarpes de hasta 10 metros y afecta depósitos aluviales, fluvioglaciares y morrenas. El análisis cinemático indica movimientos de tipo normal con componente sinestral. En la prolongación sur de la falla Chinchero, se encuentra la falla Qoricocha (Benavente *et al*., 2013).

3.1.5 Falla Qoricocha

Tiene una longitud de 8 km y corta depósitos aluviales, fluvioglaciares, morrenas, así como volcánicos shoshoníticos cuaternarios (figura 3.4) (Kaneoka y Guevara, 1984; Carlier *et al*., 2005) En 1986, ocurrió un sismo de 5.4 Mb que generó una ruptura superficial de 0.15 m (Cabrera and Sebrier, 1998). Por otro lado, en el extremo oeste de las fallas Chinchero y Tambomachay, se extiende la Falla Tamboray.

3.1.6 Falla Tamboray

Esta falla se extiende a lo largo de 3.5 km y presenta un escarpe de falla de 2 m con movimiento normal sinestral. Afecta depósitos cuaternarios modificando, en algunos casos, el curso de los ríos. La dirección de esta falla es norte-sur, lo cual sugiere deformación secundaria en un sistema *strike-slip*.

Figura 3.3 Contacto fallado entre la Formación Maras y depósitos aluviales. Se observa un escarpe conservado de 5 m de altura. Vista hacia el sur (Benavente *et al*., 2013).

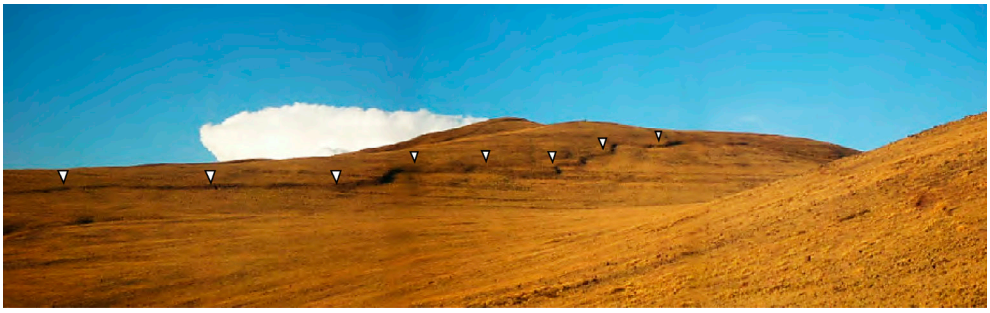


Figura 3.4 Vista de la falla activa Qoricocha. El escarpe tiene 3 m de altitud en esta zona, evidencia de la acumulación de eventos cosísmicos en el sector (Benavente *et al*., 2013).

3.1.7 Sistema de Fallas Pachatusan (SFP)

Estos segmentos de falla se extienden aproximadamente a lo largo de 30 km en un ancho de deformación de 3.5 km. Presentan escarpes que varían de 1 a 50 m (figura 3.5), con una orientación noroeste-sureste. A pesar de esto, existen segmentos fallas secundarias con dirección este-oeste. Por esta razón, en el sector noroeste del SFP, existen estructuras en *echelon* y *bends* sobre depósitos fluvioglaciares. En este sector, se observan escarpes que evidencian movimientos normales con componente horizontal que modifican el curso de los drenajes. En el sector central del SFP, se observan escarpes de falla bien conservados en depósitos morrénicos, los cuales muestran un movimiento normal predominante. En la parte sureste del SFP, se observan segmentos más continuos con dirección noroeste-sureste. Estos segmentos de falla describen movimientos normales sinestrales que afectan a los depósitos morrénicos, fluvioglaciares y volcánicos del Rumicolca.

Figura 3.5 Escarpe de la falla Pachatusan que afecta depósitos glaciares y fluvioglaciares. Se observa un desplazamiento vertical con componente horizontal. Vista al noroeste (Benavente *et al*., 2013)

3.1.8 Falla Urcos

En la prolongación este de la falla Pachatusan, se extiende la falla Urcos con una longitud de 22 km. Se le describe como tres segmentos que van desde el centro poblado de Oropesa hasta los poblados de Andahuaylillas y Urcos. Estos segmentos de falla afectan depósitos cuaternarios aluviales y fluviales a lo largo del rio Vilcanota, evidenciando movimientos de tipo normal.

3.1.9 Falla Paucarpata

Al sureste de la cuenca del Cusco, se extiende la falla Paucarpata a lo largo de 18 km con dirección noroeste- sureste.

3.1.10 Falla Amaru

Se extiende a lo largo de 50 km y evidencia una ruptura superficial de 10 m con dirección noroeste-sureste (figura 3.6).

Figura 3.6 Escarpe de falla normal de la Falla Amaru. Se puede observar el aspecto fresco de la cara o faz libre que nos da idea de su actividad reciente. El escarpe afecta morrenas laterales, así como depósitos aluviales y lacustres (Benavente *et al*., 2013).

3.1.11 Falla Antahuire

En la prolongación sureste de la falla Amaru, se extiende la Falla Antahuire. Esta falla se emplaza a lo largo de 9 km y afecta depósitos cuaternarios que evidencian movimientos de tipo normal (Benavente *et al*., 2013).

3.2 SISTEMA DE FALLAS CASACUNCA, ACOMAYO, LAGUI, LAYO(SFCALL)

Este sistema de fallas se extiende a lo largo de 170 kilómetros, con una dirección noroeste-sureste, desde el Altiplano Occidental, al norte, hasta la laguna de Pomacanchi, al sur. Este sistema de fallas afecta tanto a las areniscas de la formación Soncco como los depósitos aluviales donde se registran movimientos normales e inversos (figura 3.7) (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.7 Segmento principal activo de la de la Falla Zangarará que afecta morrenas y depósitos aluviales con un desplazamiento vertical de 10 metros. Vista tomada hacia el noreste (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.8 Escarpe de falla semicircular debido a la conexión entre los segmentos norte y central de la Falla Langui-Layo. Se observa que la falla afecta morrenas y depósitos lacustres (Benavente *et al*., 2013).

3.3 SISTEMA DE FALLAS CHINCHAIPUJIO, PARURO, ACOMAYO(SFCPA)

Se ubica al sureste de la Ciudad del Cusco y está emplazado a lo largo de 75 kilómetros con una dirección promedio de N 120º.

Las reactivaciones de esta falla deforman depósitos cuaternarios aluviales, coluviales (figura 3.10), y fluvioglaciares, lo que pone en evidencia la actividad de este sistema de fallas (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.9 Las flechas muestran escarpes de ruptura superficial de la Falla Paruro. El escarpe de falla tiene 10 m de altitud. Asimismo, se observan dolinas adyacentes a la falla (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.10 Faceta triangular asociada a la Falla Acomayo. Se puede observar, al pie del escarpe de falla, una serie de depósitos coluviales producto de las reactivaciones de la falla (Benavente *et al*., 2013).

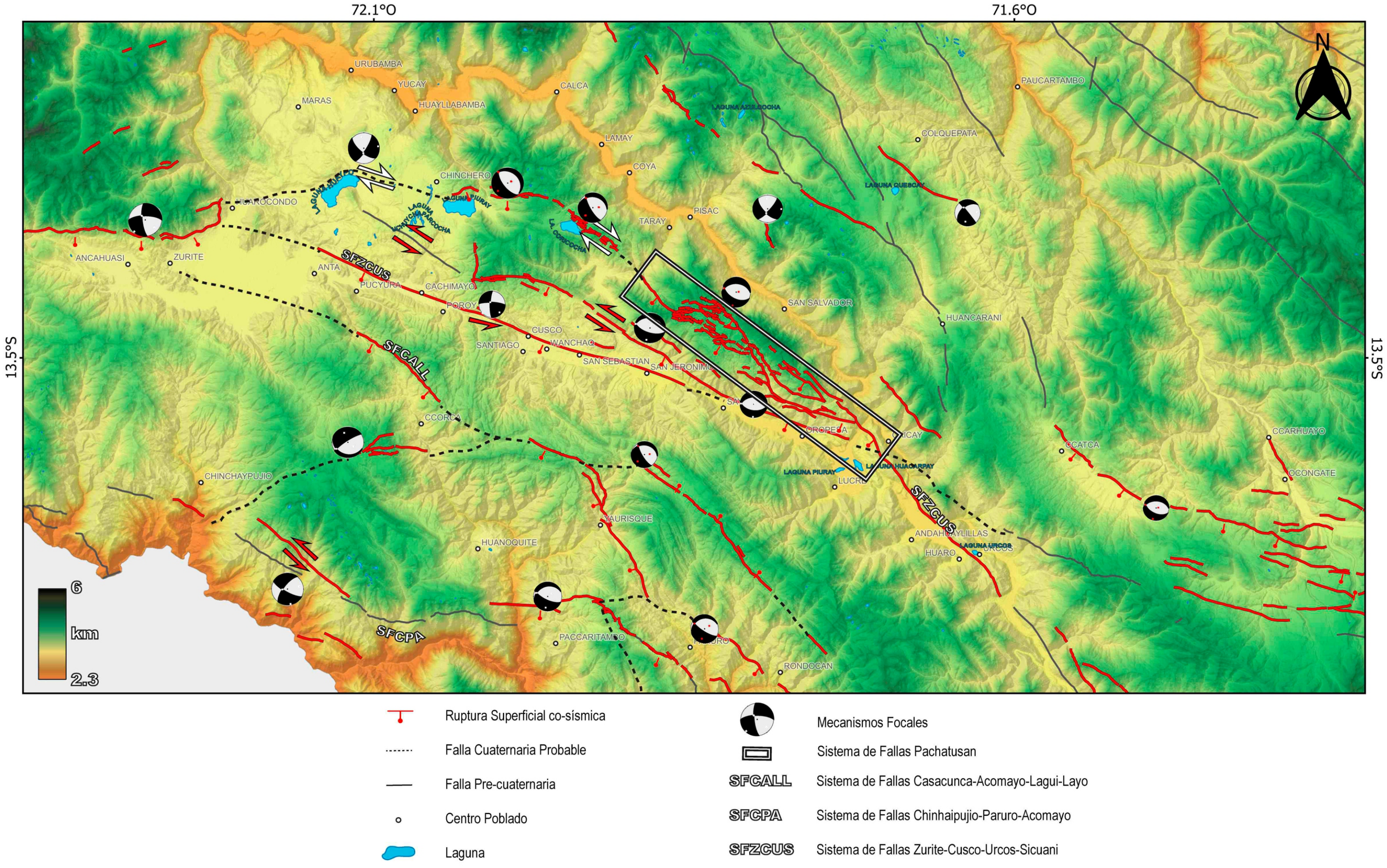


Figura 3.11 Mapa neotectónico y cinemático (Benavente *et. al.*, 2013)

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS MORFOTECTÓNICO

4.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se refiere al estudio morfotectónico del Sistema de Fallas Pachatusan, que involucra el análisis de las estructuras geomorfológicas presentes en la zona, donde la erosión glaciar y fluvial fueron los principales agentes erosivos encargados de modelar el relieve a lo largo del tiempo. Gran cantidad de geoformas, como morrenas, valles, drenajes, así como depósitos aluviales y lacustres, presentan deformación asociada a fallas geológicas, las cuales se representan como rupturas en el relieve (Jordan and Schott, 2005). La importancia de su estudio consiste en que puede proporcionarnos pistas importantes sobre la deformación tectónica cuaternaria tardía (Gabrielsen *et al*., 2002; Panizza *et al*., 1987; Ramli *et al*., 2010; Shake and McHone, 1987). Del mismo modo, el estudio nos informa acerca del estilo de deformación del Sistema de Fallas Pachatusan, conocimiento importante para determinar su potencial sísmico.

Se realizaron el cartografiado morfoestructural a detalle, así como su análisis, los cuales nos proporcionaron indicios esenciales para identificar estructuras de deformación. También utilizamos sensores remotos para identificar y cuantificar, de forma semiautomática, la deformación en superficie con la finalidad de abarcar la mayor extensión de área en el menor tiempo. Asimismo, se utilizaron imágenes satelitales; fotografías aéreas de alta resolución, para diferentes años "1956 y 2016"; modelos de elevación digital, obtenidos mediante drones con resolución de 12 cm/px; y modelos de elevación digital *pleiades* 2m/px. Para cuantificar la deformación, se utilizó un método morfométrico denominado *swath profiles*, que permite obtener un perfil topográfico representativo a través de un área. El análisis de esta información y el uso de métodos de morfometría nos permitió evaluar y cuantificar la deformación a lo largo del Sistema de Fallas Pachatusan.

4.2 METODOLOGÍA

4.2.1 Sensores remotos

Los sensores remotos nos permiten obtener información georreferenciada de la superficie terrestre en grandes extensiones de área. En este caso, se utilizaron imágenes satelitales y ortomosaicos de fotografías aéreas, así como diferentes modelos de elevación digital. Los satelitales de alta resolución desempeñan un papel importante en las aplicaciones cartográficas y geomorfológicas, siempre que todos los pasos de procesamiento sigan procedimientos estrictos y se evalúe cuidadosamente el resultado de cada paso (Barbarella *et al*., 2017).

Generación de Ortomosaico y Modelo de Elevación Digital (DEM) a partir de fotografías aéreas (1956)

Se utilizaron fotografías escaneadas a una resolución de 220 ppi y puntos de control tomados en campo con GPS. Entre las fotografías, se cuenta con un traslape de ~60 % (superposición), lo que permite encontrar mayor número de coincidencias de pixeles (figura 4.1 A), y así obtener un modelo de elevación digital y ortomosaico de mejor calidad (figura 4.2).

Para realizar esta tarea, en primer lugar, se cargan las fotografías escaneadas en el entorno de *Agisoft PhotoScan*. Antes de comenzar cualquier operación, es necesario señalar que las fotos se utilizarán como fuente para la reconstrucción 3D (figura 4.1), posteriormente se seleccionan solo las fotografías que se encuentran dentro de la zona de estudio. A continuación, se procede con el alineado de las fotografías. En esta etapa, PhotoScan encuentra la posición y la orientación de la cámara para cada foto para crear un modelo de nube de puntos dispersos (Agisoft, 2017). Cabe indicar que esta nube de puntos dispersos presenta información de elevación y ubicación.

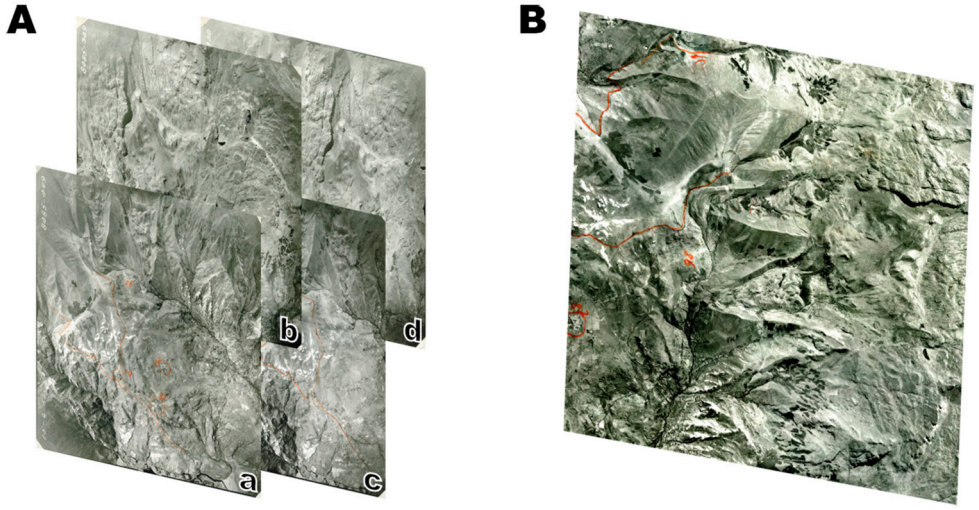


Figura 4.1 Superposición entre las fotografías aéreas a, b, c y d de 1956, utilizadas para la generación de un ortomosaico (elaboración propia)

En consecuencia, rasterizamos la nube de puntos densa para la obtención del modelo de elevación digital (Olaya, 2014). El *software* visualiza un modelo de superficie como una cuadrícula regular de valores de altura. Esto nos permite realizar mediciones de un punto, distancia, área y volumen.

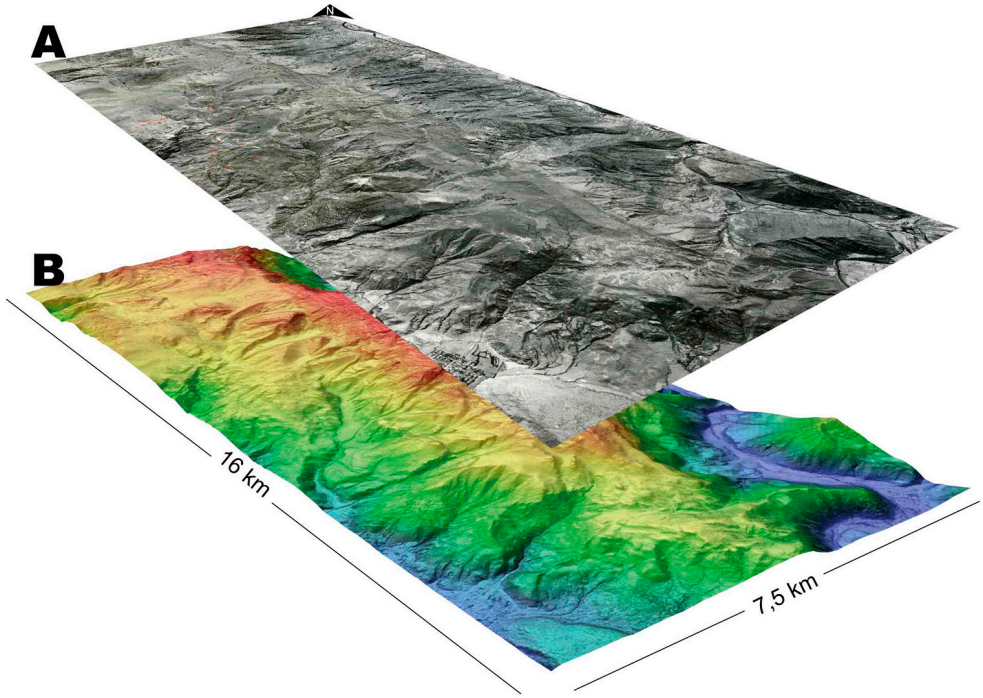


Figura 4.2 (A) ortomosaico de fotografías aéreas de 1956 con una resolución de 2.1 m/px; (B) Modelo de Elevación Digital (DEM) 1956 con una resolución de 2,1 m/px (elaboración propia).

Generación de imágenes satelitales *pleiades* (2016) y Modelo de Elevación Digital(DEM)

Los satélites son capaces de capturar imágenes de alta resolución en grandes extensiones de área con un alto nivel de detalle (Barbarella *et al*., 2017). También proporcionan imágenes *stereo* que permiten crear un modelo de elevación Digital (DEM) (Murillo-García *et al*., 2015) visual and automatic and semi-automatic analysis of high- and very highresolution (VHR.

El sistema *pleiades* tiene cobertura estereoscópica de alta resolución. La cobertura estereoscópica se realiza mediante un solo sobrevuelo del área, lo que permite la recolección de un producto homogéneo.

Los satélites *pleiades* ofrecen simultáneamente imágenes de dos modos que permiten crear un DEM:

- 1 imagen pancromática (blanco y negro)
- 4 imágenes multiespectrales (color)

La imagen pancromática incluye solo una banda de blanco y negro con una resolución de 0,5m/px. La imagen multiespectral incluye cuatro bandas -azul, rojo, verde y una cercana al infrarrojo- con una resolución de 2m/px (Astrium, 2012)(figura 4.3).

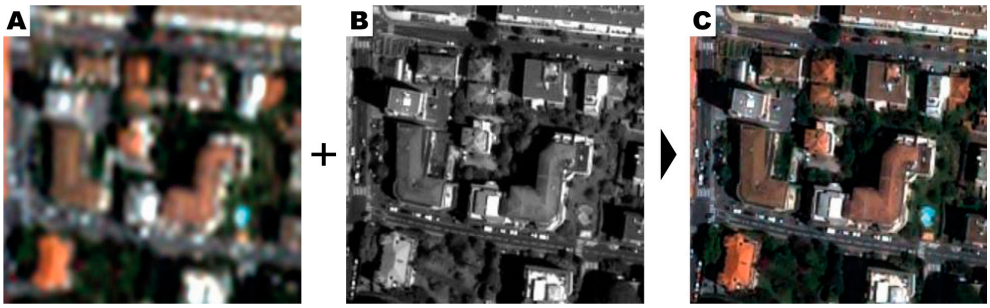


Figura 4.3 (A) combinación del producto multiespectral de 4 bandas; (B) imagen pancromática; (C) imagen de alta resolución pleiades (Astrium, 2012)

Para crear un DEM (figura 4.4) y una ortofoto, se necesita combinar imágenes pancromáticas e imágenes multiespectrales. Por tal razón, se desarrolló un programa de conversión automática PCI *Geomatics*, que cuenta con un algoritmo mejorado para la extracción de Modelos Digitales de Terreno (DEM) a partir de imágenes *pleiades* (Astrium, 2012).

Generación de ortomosaico de fotografías aéreas de *drone* (2018) y Modelo de Elevación Digital (DEM)

En los últimos años, se han incorporado nuevas tecnologías al estudio de fallas activas con el fin de obtener mejor información sobre la deformación en el relieve. En la zona de estudio, la presencia de geoformas afectadas por fallas, drenajes, depósitos lacustres, depósitos morrénicos, depósitos fluvioglaciares, entre otros de menor escala, nos obliga a contar información detallada del relieve a nivel centimétrico. Por tal razón, este trabajo utilizó DEM con resoluciones centrimétricas, obtenidas a partir de fotografías tomadas por un *drone* modelo *ebeeplus sensefly* (fotografía 4.1).

Se realizaron misiones de vuelo en dos sectores estratégicos. El primer sector está ubicado al noroeste del Sistema de Fallas Pachatusan (figura 4.5 A), abarca un área de 4.7 km^2 donde se observan escarpes de falla con un desplazamiento menor a 2m. El segundo sector está ubicado en el sector central de sistema de fallas Pachatusan (figura 4.5 B), abarca un área de 4.9 km^2 y se observan morrenas de la última máxima glaciación 14000 años (Cabrera, 1988), deformadas por falla (figura 4.5).

Asimismo, para la georreferenciación se tomaron 16 puntos de control con GPS diferencial (tabla 4.1), muy bien distribuidos en el área de vuelo. Se consideraron aspectos importantes como la toma de puntos de control en valles y en crestas (fotografía 4.2), para obtener mejores resultados en la diferencia cota del DEM.

El procedimiento para crear el ortomosaico y DEM en el *software Agisoft Photoscan* se menciona en la sección donde se explica el procesamiento de las fotografías aéreas de 1956.

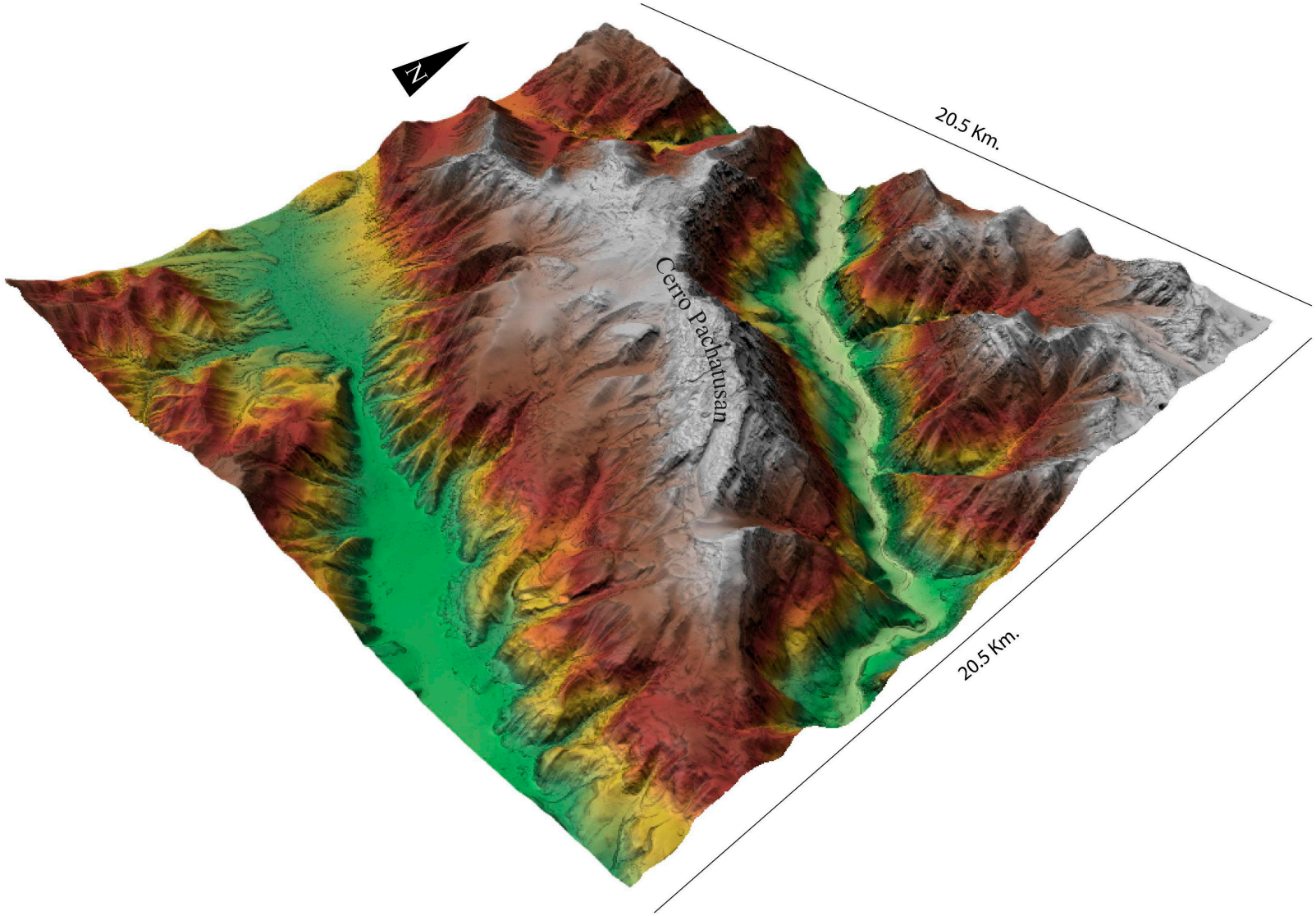


Figura 4.4 Modelo de Elevación Digital (DEM) y generación de imágenes satelitales *pleiades 2016* de la zona de Pachatusan, Cusco, con una resolución de 2.1 m/px (elaboración propia)

Fotografía 4.1 Ubicación de la zona de despegue y aterrizaje del *drone ebee plus* (fotografía de campo)

Tabla 4.1

Coordenadas de puntos de control medidos con GPS diferencial

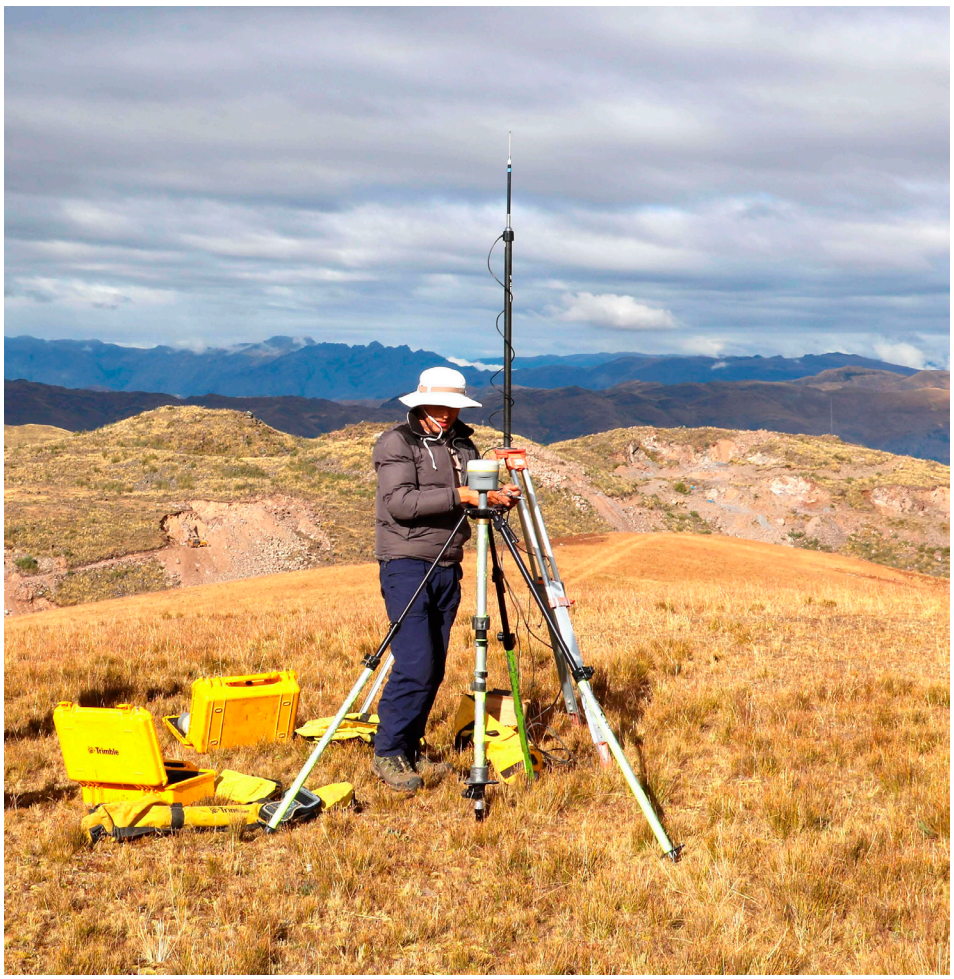
Código	Este	Norte	Elevación
HU01	195027.741	8504786.552	4275.678
HU02	195332.44	8504695.033	4284.232
HU03	194809.156	8505048.284	4277.161
HU04	194957.25	8505087.934	4293.581
HU05	194721.787	8505323.292	4286.154
HU06	194520.37	8505378.371	4270.516
HU07	192161.937	8505144.684	4230.642
HU08	191742.771	8505541.708	4210.472
HU09	192201.102	8505839.849	4260.309
HU10	191360.514	8506107.975	4294.451
HU11	190768.142	8505961.536	4310.327
HU12	190110.816	8505971.075	4289.618
HU13	189936.638	8505465.378	4201.973
HU14	189719.614	8504969.541	4168.708
HU15	190863.585	8504764.991	4024.322
HU16	191409.902	8504645.516	4058.183

4.2.2 Cartografiado morfoestructural

La deformación de un área está asociada a una serie de estructuras geológicas que han influido mucho en las rocas de diversas edades geológicas. Estas discontinuidades estructurales a menudo se asocian con características geomorfológicas como valles, crestas y taludes que son claramente perceptibles en la superficie terrestre (Jordan and Schott, 2005).

El cartografiado y análisis de estas geoformas son una parte importante de la Neotectónica y estudios de geología estructural, ya que nos proporcionan pistas esenciales sobre la deformación tectónica cuaternaria (Gabrielsen *et al*., 2002; Masoud and Koike, 2011; Panizza *et al*., 1987; Ramli *et al*., 2010; Shake and McHone, 1987).

En la actualidad, las imágenes satelitales y los modelos de elevación digital se usan ampliamente para la identificación, extracción y cartografiado rápido de lineamientos estructurales. El cartografiado se realizó mediante el proceso manual por visualización y mediante la extracción automática con ayuda de paquetes de *software Sagagis*. La identificación de lineamientos estructurales de forma automática fue más eficiente en comparación al proceso manual, ya que este está influenciado por los aspectos subjetivos (Muhammad and Awdal, 2012). Sin embargo, el impedimento principal de la extracción automática es que no es posible distinguir los lineamientos geológicos de los no geológicos.



Fotografía 4.2 Toma de puntos de control con GPS diferencial en la cresta de una morrena (fotografía de campo)

Por tal razón, para obtener mejores resultados de cartografiado morfoestructural (figura 4.6), se realizaron la comparación y el análisis de ambos métodos simultáneamente. A continuación, se describen estos procesos.

a) Fotointerpretación

La fotointerpretación es un proceso manual preciso, por lo que se requiere de mayor información, como imágenes satelitales y modelos de elevación digital, descritas a continuación. Para los *raster*, hemos utilizado el *Module Real Surface Área / SAGA-GIS Module Library Documentation* (v2.2.0).

- Imágenes satelitales

Se utilizaron imágenes satelitales de 0.5 m/px, extraídas de una plataforma de visualización y descarga de información satelital espacial de alta resolución: *TerraIncognita* 2.44. Lo interesante de este *software* es que permite descargar las imágenes ya "georreferenciadas", de manera que da la posibilidad de trabajarlas en cualquier programa SIG/GIS, como ortorectificar las imágenes en el programa *Globalmapper*.

- *Raster* de pendientes

La pendiente de un terreno representa el cambio de elevación con respecto a la distancia que se puede expresar tanto en grados como en porcentaje (Fallas, 2007). En la zona de estudio, se generó *raster* de pendientes en los DEM de *drone, pleiades* y de 1956. El procesamiento se realizó en el software Saga Gis mediante el uso de la herramienta direccionada en: *Geoprocessing* > *Terrain Analyses* > *Morphometry* > *Slope*, *Aspect, Curvature.*

- *Raster* de aspecto

El *raster* de aspecto contiene los valores de las direcciones a las que se enfrentan las pendientes físicas de la superficie de la tierra. El resultado se expresa en grados (0, 360º) y en el sentido en que giran las agujas del reloj: el norte corresponde a 0º; 90º

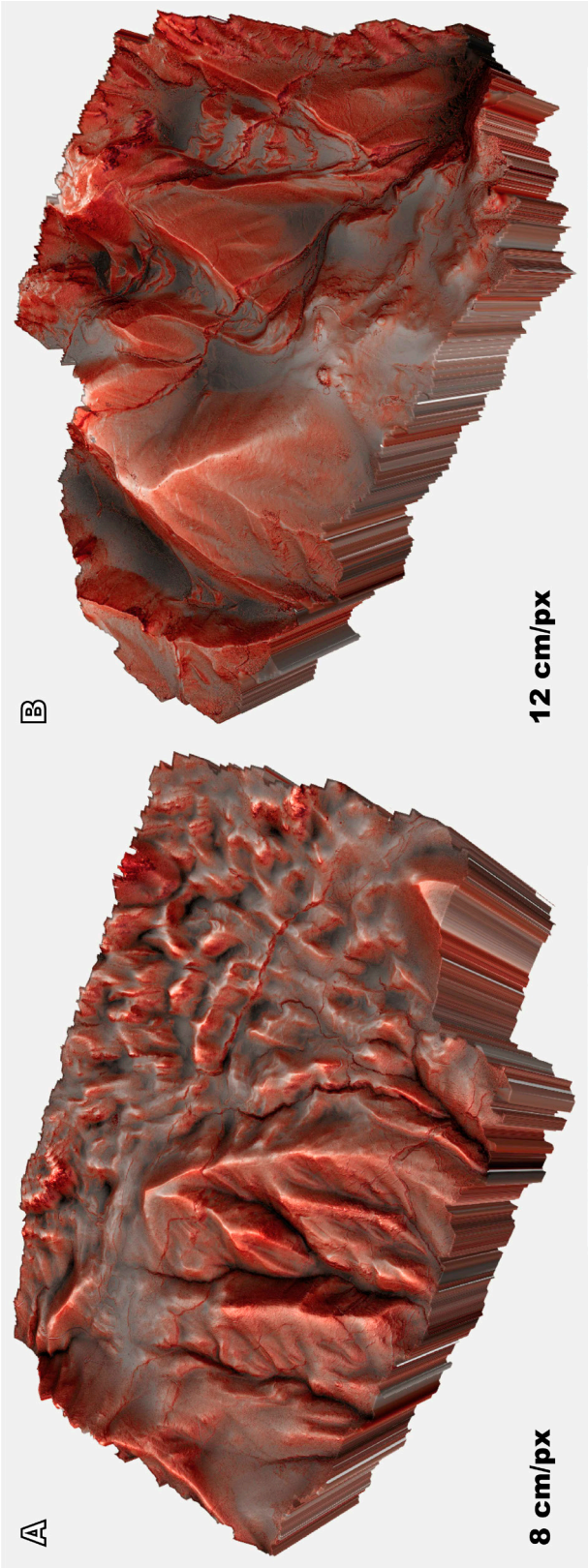


Figura 4.5 Modelos de Elevación Digital (DEM) procesados a partir de vuelos con *drone* (A) sector noroeste del Sistema de Fallas Pachatusan; (B) sector central del Sistema de Fallas Pachatusan (elaboración propia)

corresponde al este; 180º al sur, y 270º al oeste. A las áreas planas, se les asigna un valor de -1º (Fallas, 2007).

El procesamiento de este tipo de *ráster* se realizó en el programa Saga GIS, el cual trabaja con una reclasificación de 360º en cuadrantes y subdiales (Calogero Schillaciet *et al*.), para el procesamiento revisar la guía de pasos detallada en el Módulo de Pendiente, Aspecto y Curvatura.

- Raster Hillslope Index- Ridge Detection

Identifica crestas y valles del relieve sobre imágenes digitales (Haralick en 1983). Su metodología se basa en encontrar ceros que cruzan desde la primera derivada direccional, tomada en una dirección que extremiza la segunda derivada direccional a partir de la data que contiene cada celda de un MDE.

El procesamiento de generación de este *raster* se realizó en el programa Saga GIS, siguiendo los pasos que se detallan en el Módulo de Detección de Valles y Crestas.

- Raster Land Surface Real Index

El índice de Superficie real está muy relacionado con la pendiente y está referido a la superficie real de una celda (Olaya, 2014).

Si tenemos una capa con un tamaño de celda ΔS, el área ocupada por la misma será A=ΔS2. No obstante, se trata de un área planimétrica, por lo tanto, se necesita tener una información más realista. Así, se calcula el valor del índice de superficie real según el método de Jenness, (2004). Para la generación de este *raster*, se utilizó el software Saga GIS, siguiendo los pasos del Módulo de Superficie de Área Real.

b) Extracción automática

La extracción automática suele ser una técnica eficiente; sin embargo, dependerá de la calidad de resolución del DEM para obtener buenos resultados. Se utilizaron DEM con resoluciones que van desde los 0,1 m/px (DEM de *Drone*) a 2,1 m/px (DEM de *Pleiades*).

- Extracción de Drenajes y crestas

La extracción de drenajes y/o canales consiste en definir, de entre las celdas del DEM, cuales forman parte de un cauce (Olaya, 2014).

El proceso se realizó con el software Saga Gis. El proceso comienza con el módulo *Fill Sink* (Wang and Liu). Este módulo utiliza un algoritmo propuesto por Wang y Liu para identificar y rellenar las imperfecciones de la superficie mediante modelos digitales de elevación Saga Gis. Después de corregir las imperfecciones del DEM, generamos los canales con el módulo *Terrain Analisys-Morphometry-Channel Network* dentro del entorno de Saga GIS.

Las redes de los canales se generan en formato raster, lo que ayuda a cartografiar e identificar la variación en el curso de los drenajes, e identificar la deformación reciente del relieve. El proceso para la extracción de las crestas es el mismo utilizado para extraer los drenajes. Se utilizó un DEM con los datos de cada pixel invertidos, de manera que lo que antes se visualizaba como crestas ahora se ve como drenajes.

El procedimiento para invertir los datos de un DEM se realizó en QGIS con la herramienta *Raster Calculator*, que permitió cargar el DEM y multiplicar por (-1).

4.2.3 Cuantificación de desplazamientos

En regiones tectónicamente activas, como el sistema de fallas Pachatusan, las geoformas desplazadas, las desviaciones locales en la red de los drenajes y rupturas en superficie están fuertemente influenciados por la deformación tectónica (figura 4.7).

La importancia de cuantificar estos desplazamientos radica en que son parámetros comúnmente utilizados para evaluar el potencial sísmico (Wells and Coppersmith, 1994) y conocer la deformación desde el Cuaternario hasta la actualidad.

El método de medición utilizado consiste en generar *Swath Profiles* a lo largo de la traza de falla. Esta es una versión mejorada de perfiles topográficos sobre modelos de elevación digital DEM (Telbisz *et al*., 2013). Se utilizaron DEM de 2,1 m/px, 0,1 m/px y 0,12 m/px.

Perfiles Swath

El análisis de *Swath Profile* demostró ser útil para evaluar los movimientos verticales del Orógeno, así como para la investigación de la deformación reciente en superficie (Telbisz *et al*., 2013).

Un *Swath Profile* extrae datos de elevación de un área en la superficie que consiste de puntos distribuidos uniformemente e interpolados al DEM. Este conjunto de datos puntuales de elevación se utiliza para calcular variables estadísticas que muestran características específicas de la topografía, como rupturas y desplazamientos que no se pueden mapear con una sola línea perfil. Para visualizar estos datos, se utiliza un gráfico de dos entradas: distancia versus altura.

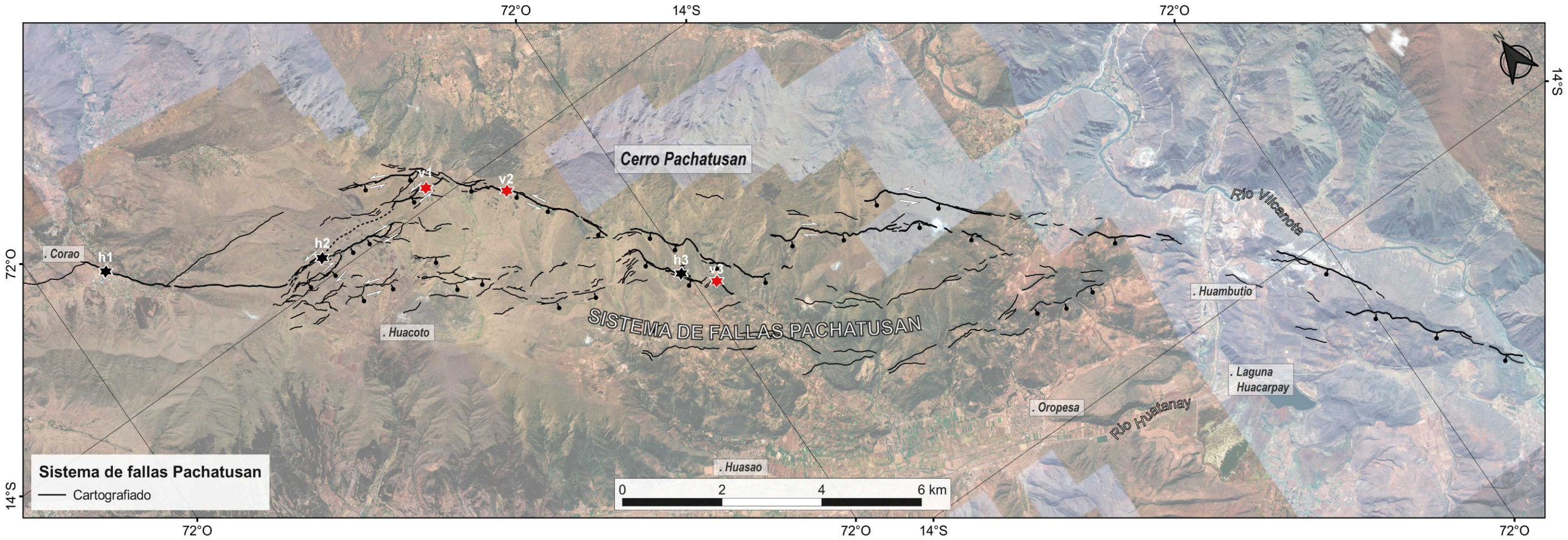


Figura 4.6 Cartografiado del Sistema de Fallas Pachatusan. Las líneas de color negro representan los trazos de falla que afectan depósitos cuaternarios. Las estrellas de color rojo con borde blanco muestran depósitos fluvioglaciares (h1, h2) y depósitos morrénicos (h3) desplazados horizontalmente. Las estrellas de color negro con borde blanco muestran depósitos fluvioglaciares (v1, v2) y depósitos morrénicos (v3) desplazados verticalmente. En estos puntos, se cuantificó el desplazamiento con *swath profiles*, como se explica en las Figuras 4.18, 4.19, 4.20, 4.22, 4.23, 4.24 (elaboración propia).

Figura 4.7 Morrena afectada por falla con un desplazamiento de tipo normal (vista al este)

Desplazamiento Vertical

El desplazamiento vertical se calculó con un algoritmo que identifica la diferencia de altura entre las superficies del *hangingwall* y el *footwall* (Aguirre, 2018). Este es el procedimiento que permitió generar *Swath Profiles* transversales a los trazos de falla.

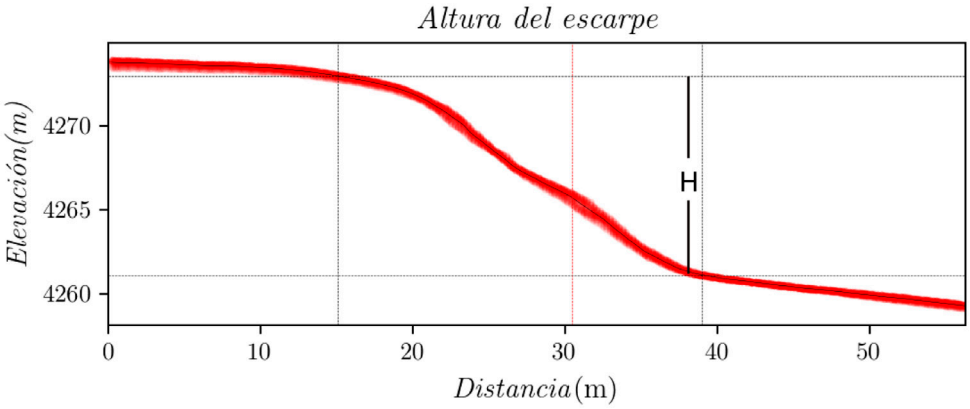


Figura 4.8 *Swath Profile* para el cálculo de *offset* vertical (elaboración propia)

Desplazamiento Horizontal

Para el cálculo del desplazamiento horizontal, se generaron *Swath Profiles* transversales a los lineamientos, de manera que se identificó el desplazamiento en los ejes de drenajes y morrenas. Además, tenemos que considerar dos aspectos importantes para conocer el desplazamiento real:

- El azimut no es constante a lo largo del lineamiento, ya sea antes o después de la ruptura sísmica.
- La falla no siempre corta de forma transversal a los lineamientos.

Por tal razón, se generaron dos *Swath Profiles*: uno transversal al lineamiento del bloque fijo (footwall) y otro al del bloque que se mueve (*hangingwall*). El promedio de ambas medidas (figura 4. 10) se proyecta al azimut real de la falla.

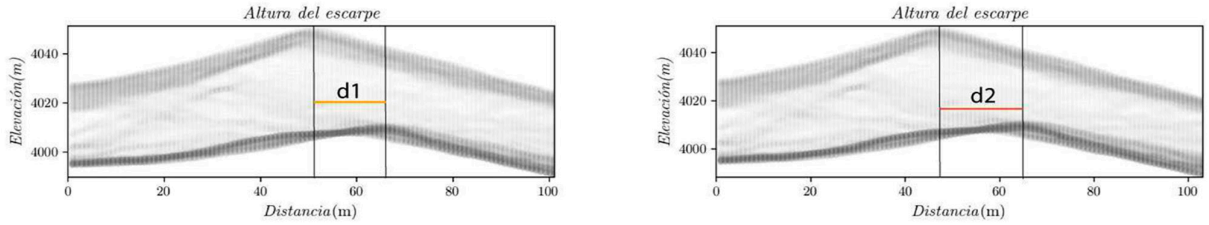


Figura 4.9 Gráficos de Elevación/Distancia, donde se plotean los datos de elevación del relieve. Cada gráfico presenta una acumulación de datos con tonos más oscuros que nos dan información de dos superficies desplazadas (elaboración propia).

En la figura 4.10, observamos una morrena afectada por una falla sinestral. A continuación, explicamos el sencillo método numérico para obtener el desplazamiento real.

- Se grafica las líneas de perfil perpendiculares a la morrena fija y la morrena desplazada.
- A partir de las líneas de perfil se generan los *Swath Profile*.
- Se miden los desplazamientos d1 y d2 en cada *Swath Profile*, como se muestra en la figura 4.9.
- Se miden los azimuts Az1 y Az2 de las líneas de perfil, así como el azimut de la falla Azf, como se muestra en la figura 4.10.
- Calculamos el desplazamiento real aplicando la fórmula de la figura 4.10.

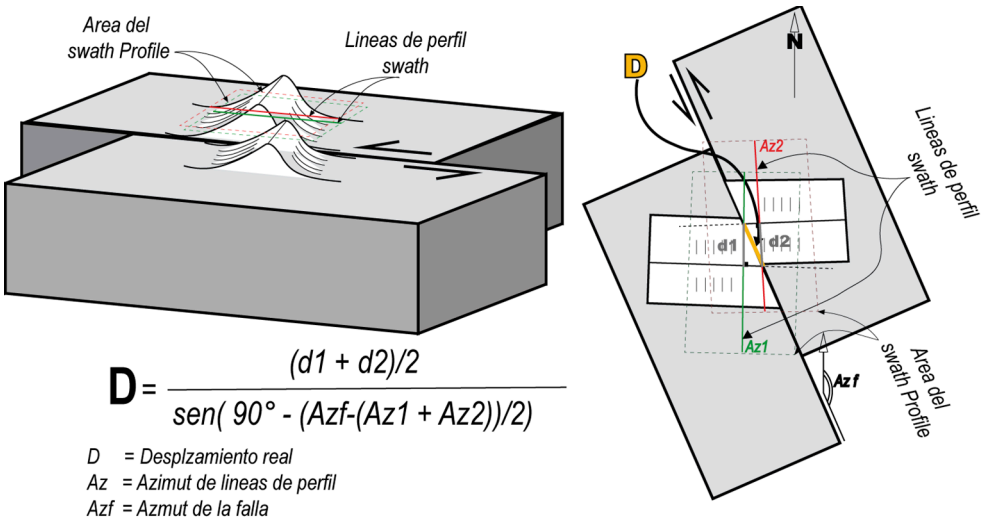


Figura 4.10 Medidas realizadas para el cálculo del desplazamiento real con el método de *Swath Profile*. Se muestra un ejemplo con los dos casos mencionados anteriormente (elaboración propia).

4.3 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El cartografiado de las fallas y de geoformas generadas por la deformación (fotografía 4.3), nos permite conocer mejor el estilo de deformación del Sistema de Fallas Pachatusan. Además, nos ayuda a realizar adecuadamente la cuantificación de la deformación, puesto que es un aspecto importante para la ubicación y alineamiento de los *Swath Profiles*.

Fotografía 4.3 Pequeñas depresiones o *sagponds* originadas por la reactivación de una falla y la acomodación del relieve (fotografía aérea en campo con *Drone Ebee plus* 2018 vista en planta).

En el cartografiado de detalle, nos podemos dar cuenta de que los trazos de falla del sistema (SFP) presentan una variación notoria de dirección. En los extremos noroeste y sureste, podemos observar trazos de falla continuos en dirección NO-SE; sin embargo, en la zona central, al norte del centro poblado de Huacoto, existe una mayor distribución de los trazos de falla en dirección E-O.

En base al análisis morfoestructural de los trazos de falla, se sugiere que se trata de un sistema de fallas normales con un importante componente de rumbo. La configuración y disposición estructural de los trazos de falla, comparados con los modelos teóricos, así lo demuestran (Angelier *et al*., 2004; Burg, 2015; Cunningham and Mann, 2007; Lettis *et al*., 2002; Wakabayashi, 2007).

Se observa la falla principal en dirección NO-SE, mientras que, en la zona central, encontramos mayor distribución de fallas discontinuas. Estas constituyen estructuras en forma de sigmoides con una tendencia en dirección E-O. Por tal razón, sugerimos que existe una duplexación en esta zona, como lo explica Tchalenko (1970) en sus ejemplos.

Estos segmentos de falla a menudo se comportan como cizallas de Riedel conjugadas en *echelon* (R y R', figura 4.11), con un desplazamiento bajo, y se unen entre sí en fallas principales por cizalla (P y D, figura 4.11) (Woodcock and Fischer, 1986).

Con este análisis, se complementan los trabajos que muestran deformación normal pura en esta región (Sébrier *et al*., 1985), así como trabajos recientes como el de Benavente *et al*. (2013) donde solo se menciona el tipo de desplazamiento.

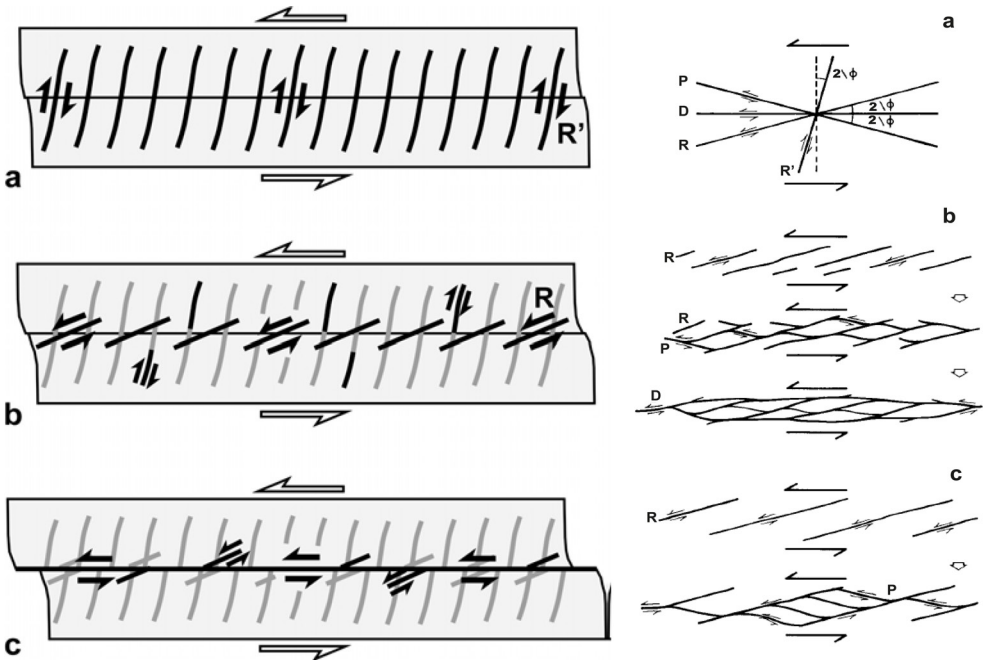


Figura 4.11 Comportamiento de un sistema tipo *Strike-slip* en diferentes etapas de la deformación (Angelier *et al*., 2003; Woodcock and Fischer, 1986).

4.3.1 Evidencia de deformación por falla

En la figura 4.14, se muestra el cartografiado de los trazos de fallas en líneas de color rojo; los depósitos morrénicos con polígonos en color crema; asimismo, los drenajes extraídos del software Saga GIS en líneas de color celeste.

Se utilizó un *raster* RRIM procesado a partir de un DEM con resolución de 10 cm/px para poder identificar con mayor facilidad los escarpes de fallas (figura 4.14 A, B, C). Se observan muy claramente escarpes de falla sobre depósitos fluvioglaciares (figura 4.14. 1). Estos escarpes de falla presentan una morfología propia del desarrollo de un sistema *strike-slip* sinestral con componente normal, llamado comúnmente bends o, traducidas al español, curvaturas de falla (figura 4.14 A)(Burg, 2015; Cunningham and Mann, 2007; Wakabayashi, 2007; Woodcock and Fischer, 1986) .

Se observa claramente una morrena deformada por falla, con desplazamiento tipo dextral y componente normal (figura 4.14 B). A lo largo de este trazo, se observan sigmoides de deformación (*duplex*) (figura 4.12), lo que nos indica que existe un desplazamiento horizontal importante (Wakabayashi, 2007). Cabe indicar que las morrenas tienen una edad estimada 14 k años según Cabrera (1988).

En la figura 4.14 C, se muestra claramente un escarpe de falla tipo normal; sin embargo, podemos observar un cuerpo morrénico afectado por falla con desplazamiento horizontal tipo dextral. La morfología de este cuerpo morrénico sugiere una edad holocena, según las comparaciones que hace Cabrera and Sebrier (1998)con las morrenas del Ausangate.

En la figura 4.13 1, se muestra la diferencia clara entre los depósitos morrénicos holocénicos y las morrenas de 14k años (Cabrera, 1988). Estas morrenas están deformadas por fallas, representadas con líneas de color rojo. Los polígonos más claros representan morrenas de mayor tamaño y edad. Morfológicamente, presentan el frente morrénico cortado con morrenas laterales bien conservadas; además, Cabrera (1988) les coloca una edad de 14 k años. Los polígonos más oscuros representan morrenas más recientes. Morfológicamente, se conservan con un aspecto caótico que nos indica que se trata de morrenas holocenas.

Se observan morrenas de 14k años y morrenas holocenas, ambas afectadas por el mismo trazo de falla (figura 4.13 A, B); asimismo, se observa una falla correspondiente antitética, que afecta depósitos morrénicos de ambas edades (figura 4.13 A).

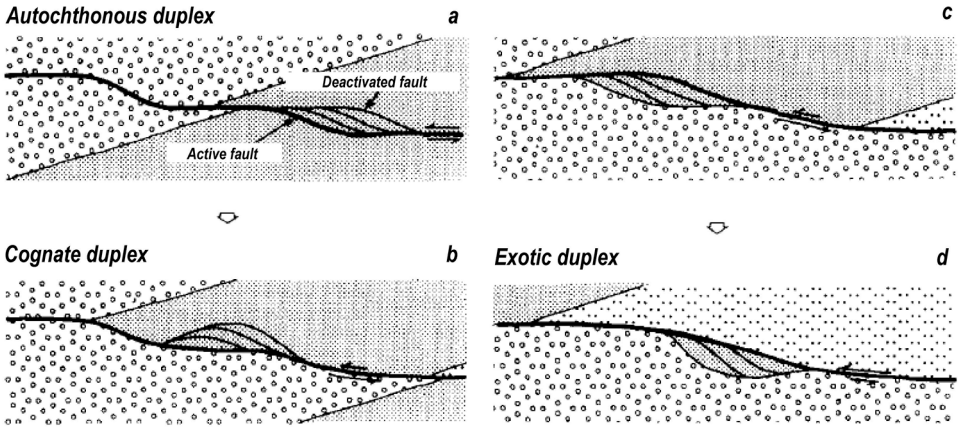


Figura 4.12 Proceso de transformación y migración de un *dúplex* (Woodcock and Fischer, 1986)

4.3.2 Cuantificación de la deformación

El cartografiado morfoestructural es importante para comprender el estilo de deformación del sistema de fallas Pachatusan, y poder afirmar que, además de la componente extensiva existe una componente transcurrente importante (figura 4.15). A partir de este concepto, empezamos a cuantificar la deformación de las fallas.

Cuantificar la deformación nos ayudará a determinar las tasas de desplazamiento de la falla, tanto del componente vertical como del horizontal.

Además de complementar el análisis del cartografiado morfoestructural con relación a los escarpes de la falla principal y los escarpes formados en la zona de mayor deformación.

Desplazamiento Horizontal

Existen 29 puntos GPS con la ubicación de geoformas desplazadas, entre drenajes, morrenas y otros lineamientos. En 12 zonas, se cuantificó el desplazamiento con el método *Swath profile* sobre modelos de elevación digital obtenida con *Drone*, en las otras 17 zonas se midieron los desplazamientos sobre una imagen satelital Pleiades de 2016, utilizando herramientas de medición directa en Qgis.

Es importante mencionar que, en total, existen 24 medidas de *Swath profile*, ya que hay dos medidas por cada punto, como se explica en la parte metodológica (figura 4.10).

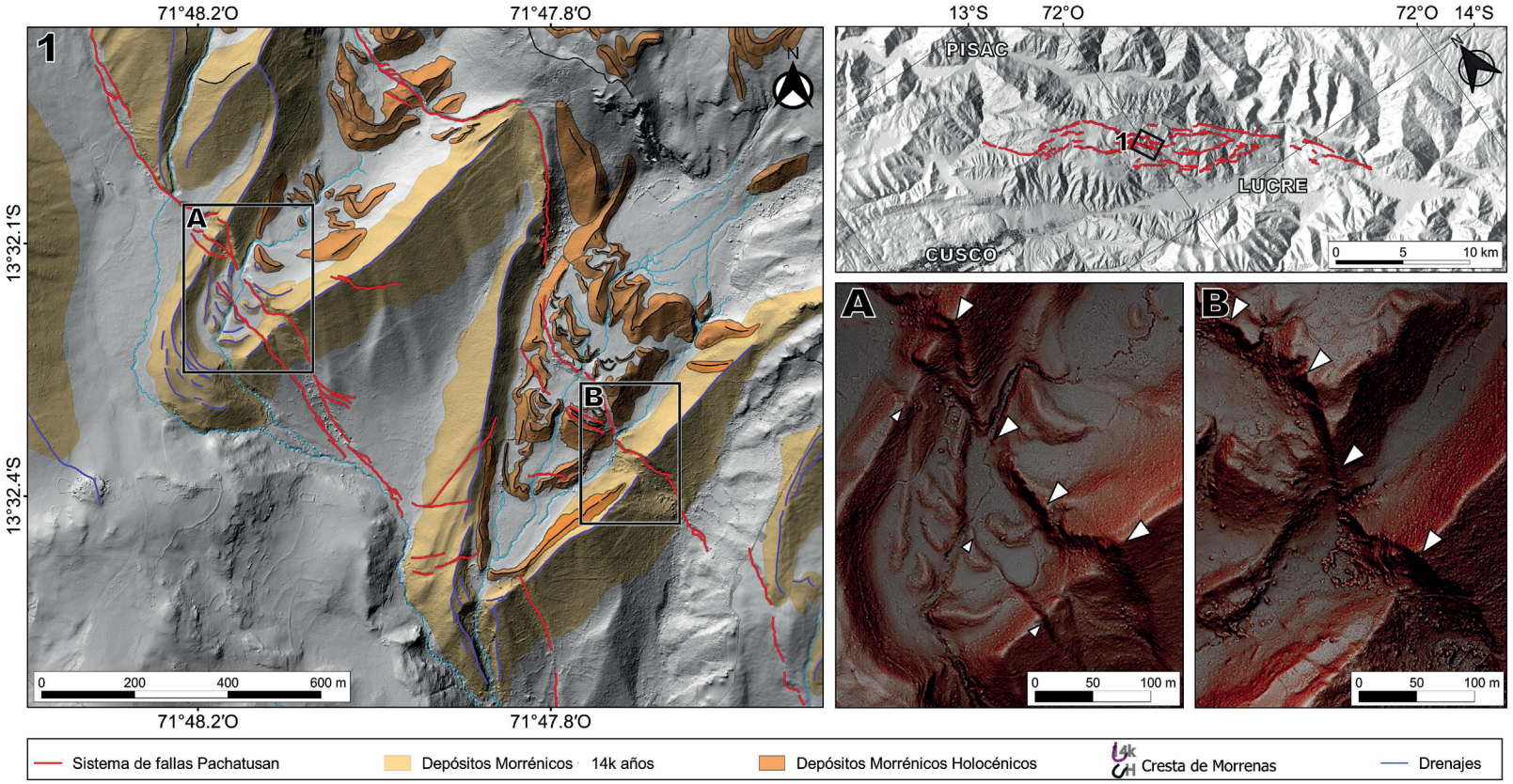


Figura 4.13 Cartografiado de unidades morfoestructurales del sector central del Sistema de Fallas Pachatusan; cartografiado de los trazos de fallas en líneas de color rojo y los depósitos morrénicos en polígonos cremas (elaboración propia)

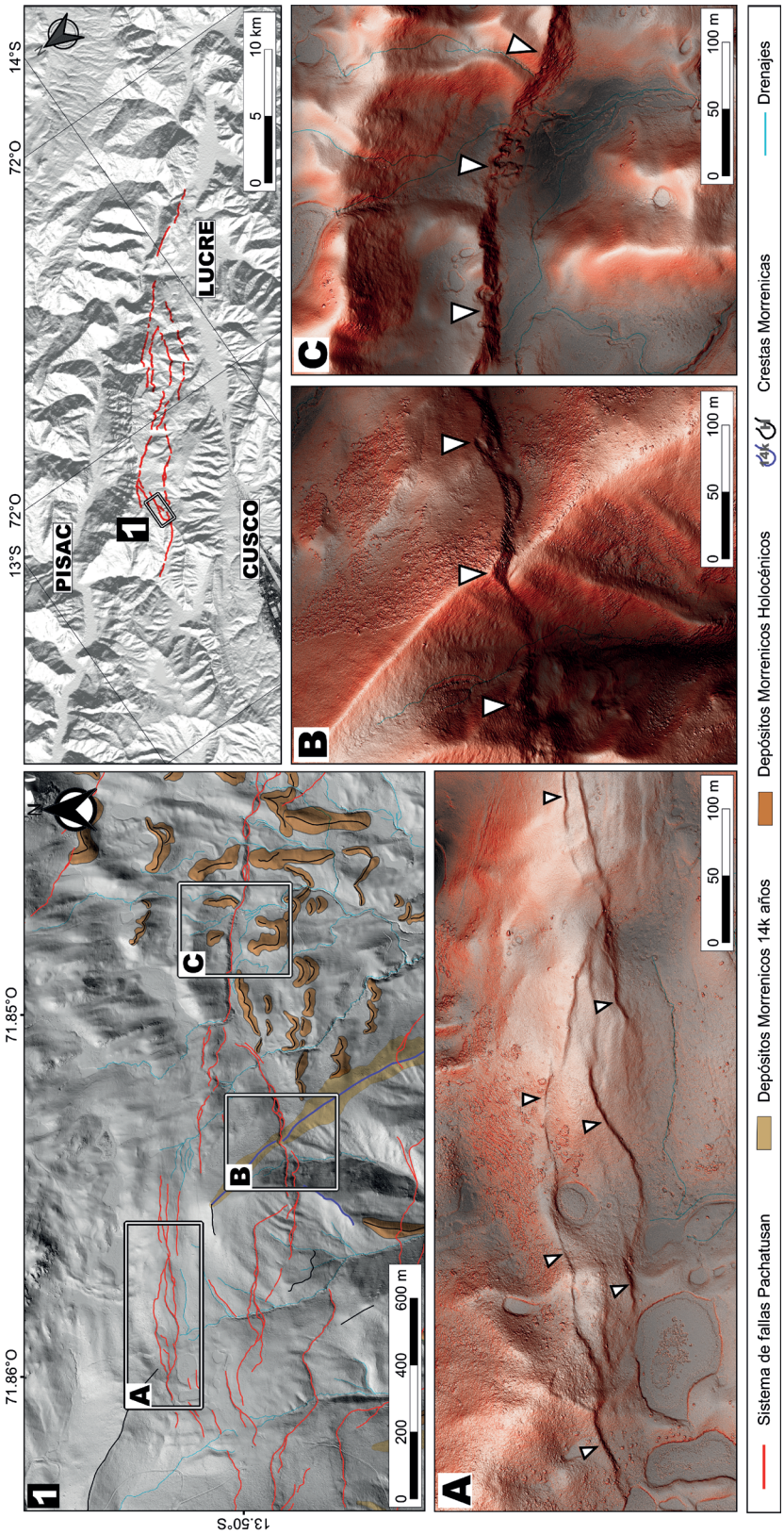


Figura 4.14 Cartografiado de unidades morfoestructurales del sector NO del Sistema de Fallas Pachatusan, cartografiado de los trazos de fallas en líneas de color rojo y los depósitos morrénicos en polígonos cremas (elaboración propia)

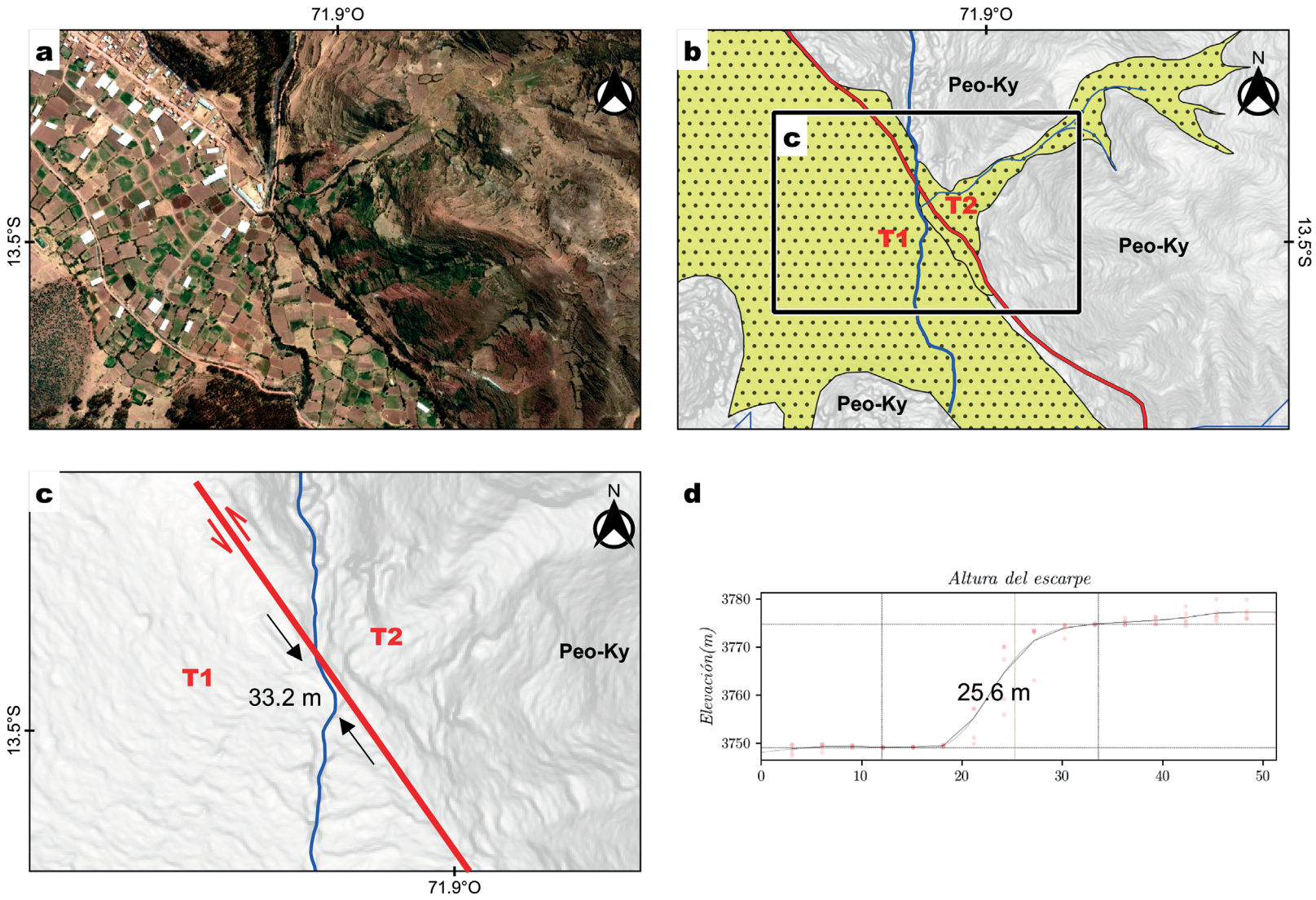


Figura 4.15 Depósitos cuaternarios aluviales desplazados por falla en el sector Amaro (a) imagen satelital de un canal de río que incisa depósitos aluviales afectados por falla con un desplazamiento vertical de tipo normal y un desplazamiento horizontal sinestral; (b) en líneas rojas el trazo de la falla que afecta terrazas aluviales en polígonos amarillos(T1 y T2), estos depósitos sobreyacen rocas de la formación Kayra; (c) desplazamiento horizontal sinestral de 33.2 m medido sobre un DEM *Pleiades* de 2.1 m/px de resolución; (d) desplazamiento vertical normal de 25.6 m medido sobre un DEM *Pleiades* de 2.1 m/px de resolución (elaboración propia)

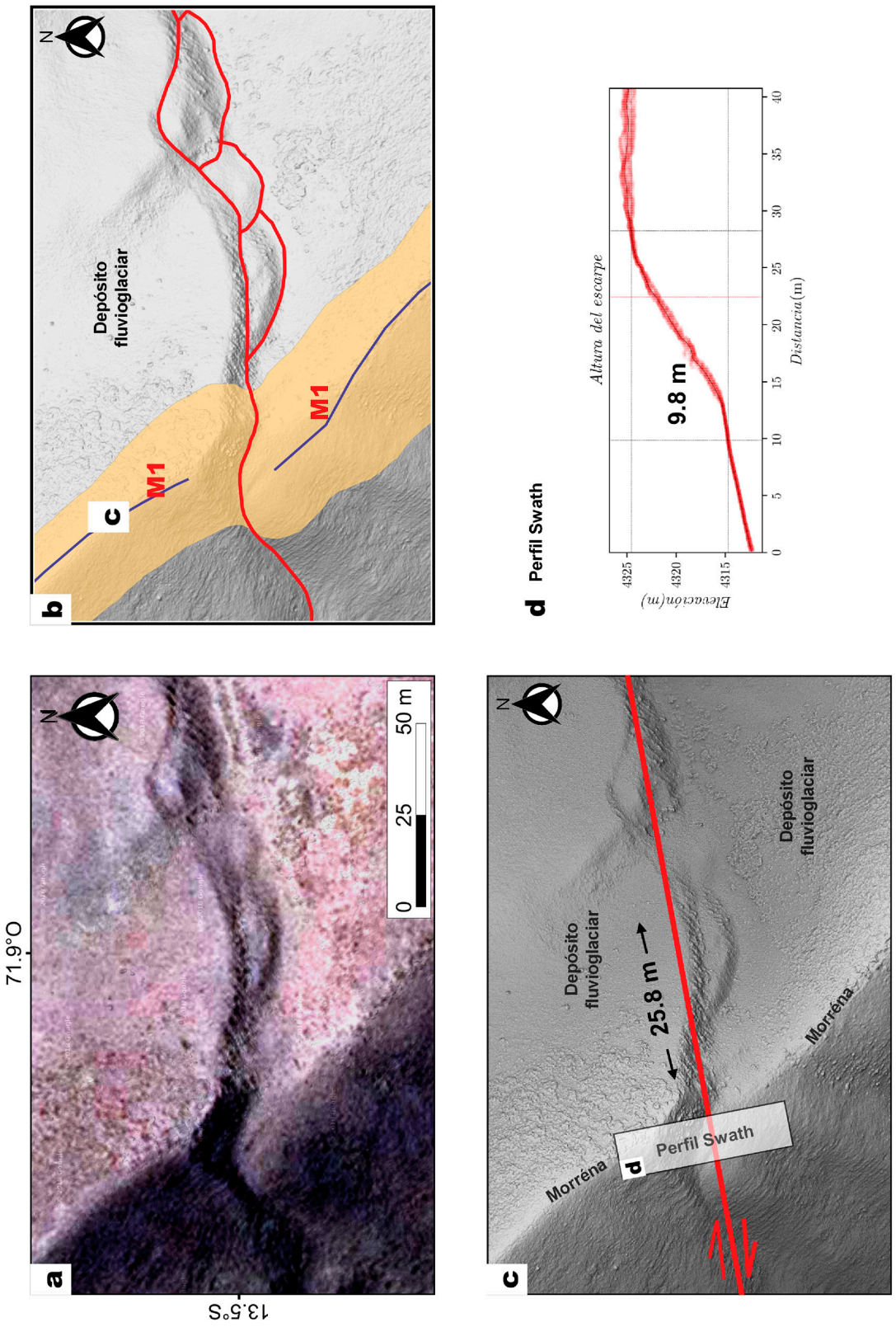


Figura 4.16 Depósitos cuaternarios morrénicos y fluvioglaciares desplazados por falla en el sector Amaro (a) morrena deformada por falla con un claro desplazamiento de tipo normal y un desplazamiento horizontal sinestral; (b) en líneas rojas el trazo de la falla que afecta una morrena representada con polígonos de color crema; (c) desplazamiento horizontal sinestral de 25.8 m medido sobre un DEM de *Drone* de 8 cm/px de resolución; (d) desplazamiento vertical normal de 25.6 m medido sobre un DEM *Drone* de 8 cm/px de resolución (elaboración propia)

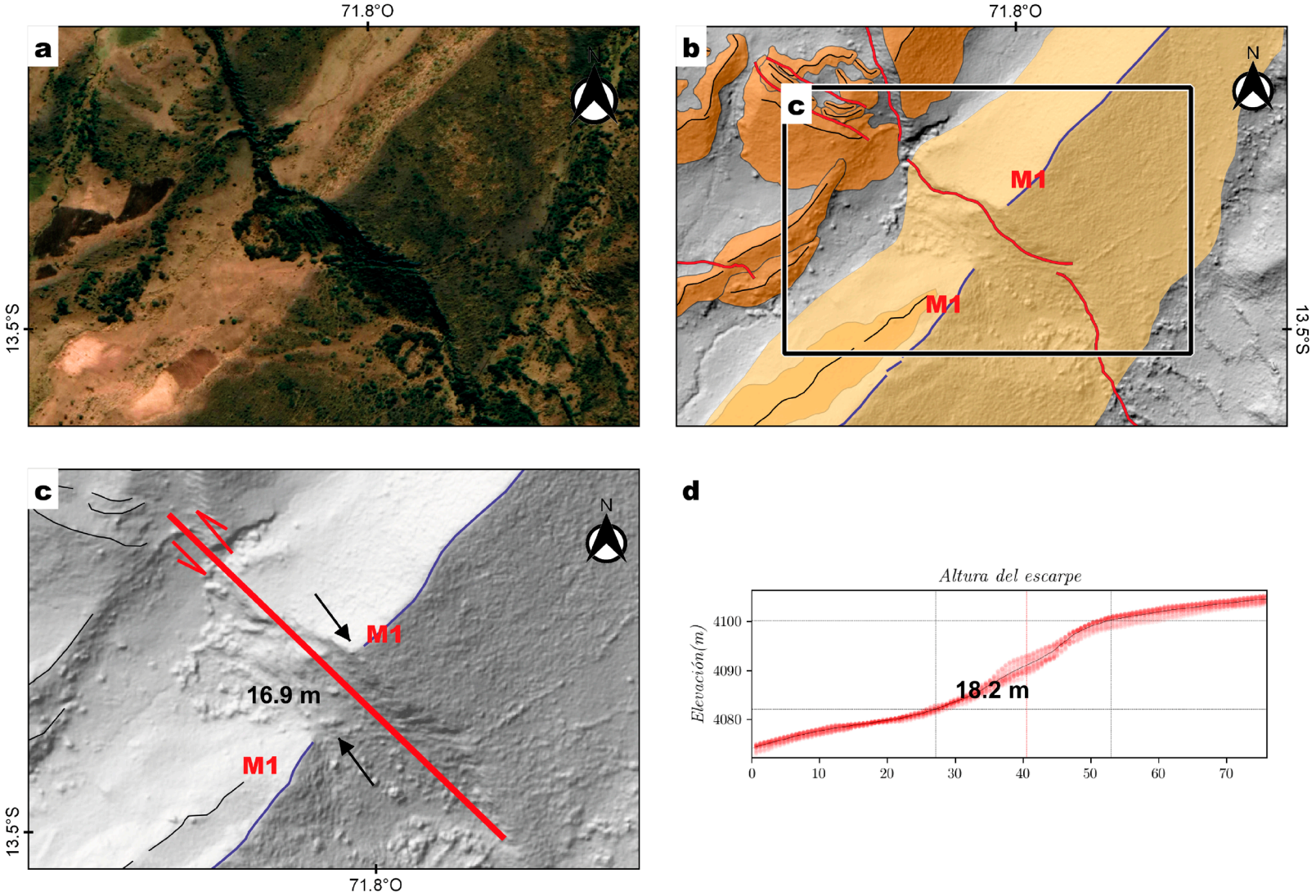


Figura 4.17 Depósitos cuaternarios morrénicos desplazados por falla en el sector Chincacocha (a) depósito morrénico afectado por falla con un desplazamiento vertical de tipo normal y un desplazamiento horizontal sinestral; (b) en líneas rojas el trazo de la falla que afecta una morrena representado con polígono en color crema; (c) desplazamiento horizontal sinestral de 17.5 m, medido sobre un DEM de *Drone* de 8cm/px de resolución; (d) desplazamiento vertical normal de 18.2 m, medido sobre un DEM de *Drone* de 8cm/px de resolución (elaboración propia).

Tabla 4.2

Medidas realizadas para el cálculo del desplazamiento horizontal real (ver figura 4.10)

	Az perfil 1	Az perfil 2	ΔAz. Falla	d1	d2	Δd	D *(real)*
1	99°	99°	136°	24	29	26.5	33.2
2	83°	85°	92°	6.8	8.2	7.5	7.6
3	41°	44°	85°	17	21	19	25.8
4	46°	47°	88°	1.5	2	1.75	2.3
5	162°	153°	109°	19	18.8	18.9	28.5
6	72°	73°	93°	6.3	5.8	6.05	6.5
7	103°	103°	117°	16.7	17.7	17.2	17.7
8	143°	147°	142°	20.2	27.1	23.65	23.7
9	145°	146°	142°	11.8	13.9	12.85	12.9
10	140°	147°	149°	16	4.5	10.25	10.3
11	131°	133°	147°	14.8	19	16.9	17.5
12	108°	109°	120°	31.4	30.8	31.1	31.7

Los resultados obtenidos nos muestran que los trazos de falla principal presentan desplazamientos laterales de 15 a más de 20 metros (figura 4.18 y figura 4.20), y una distribución de la deformación en la zona central (figura 4.19), donde observamos estructuras sigmoidales, *bends* y echelones con desplazamientos menores de 2 a 10 metros.

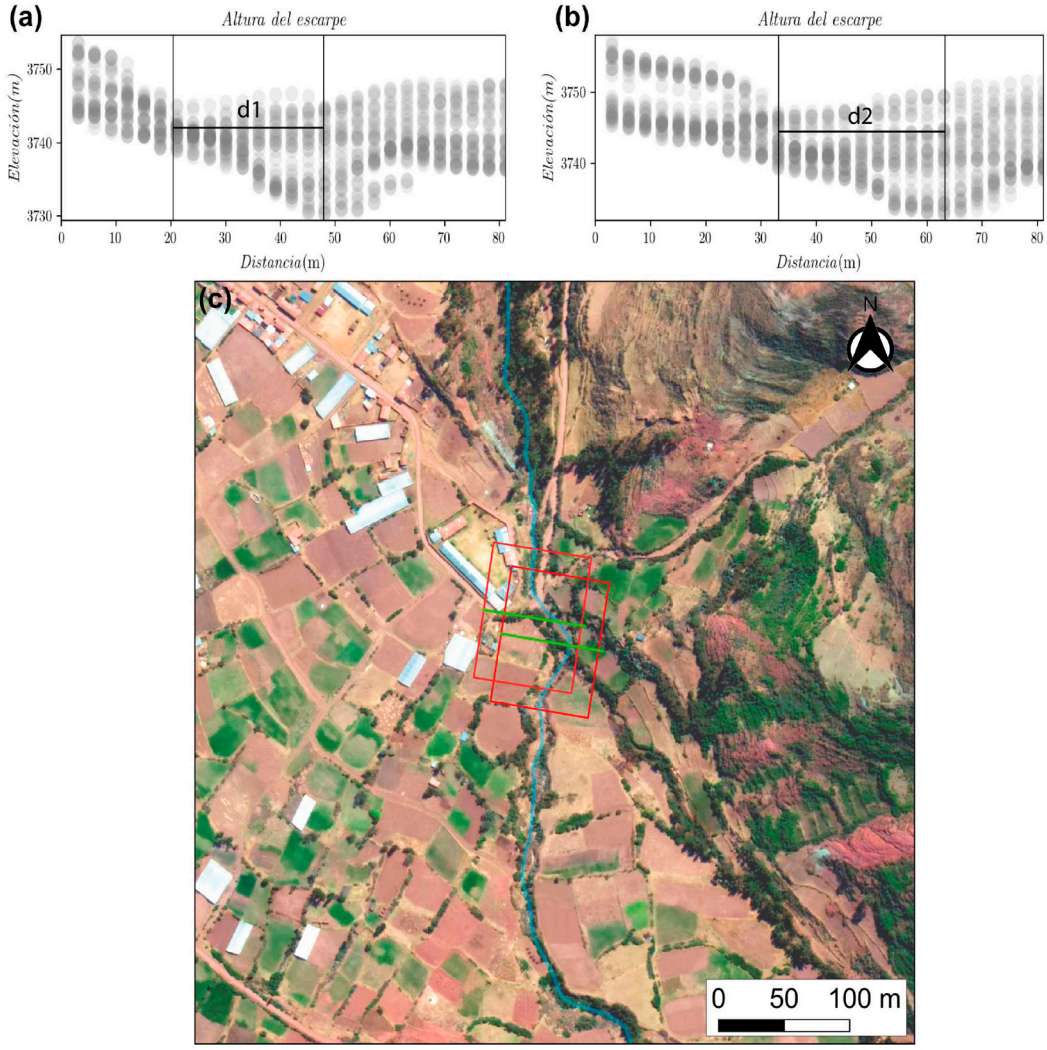


Figura 4.18 Sector Matinga (h1 en figura 4.6), medida del desplazamiento transcurrente con el uso de *Swath Profiles*; en a) y b) datos de elevación ploteados en un gráfico *elevación* vs *distancia*, donde se observan tonos oscuros por la acumulación de datos, las superficies cóncavas representan los canales desplazados. (a) *Swath Profile* medido de forma transversal al canal del bloque fijo con un desplazamiento horizontal de 24 m; (b) *Swath Profile* medido de forma transversal al canal del bloque desplazado con un desplazamiento horizontal de 29 m; (c) canal de rio desplazado horizontalmente por falla; las líneas de color verde representan los perfiles transversales a los drenajes desplazados, tanto del bloque desplazado como del bloque fijo; las líneas de color rojo muestran el área donde se realizó el *Swath Profile* (elaboración propia).

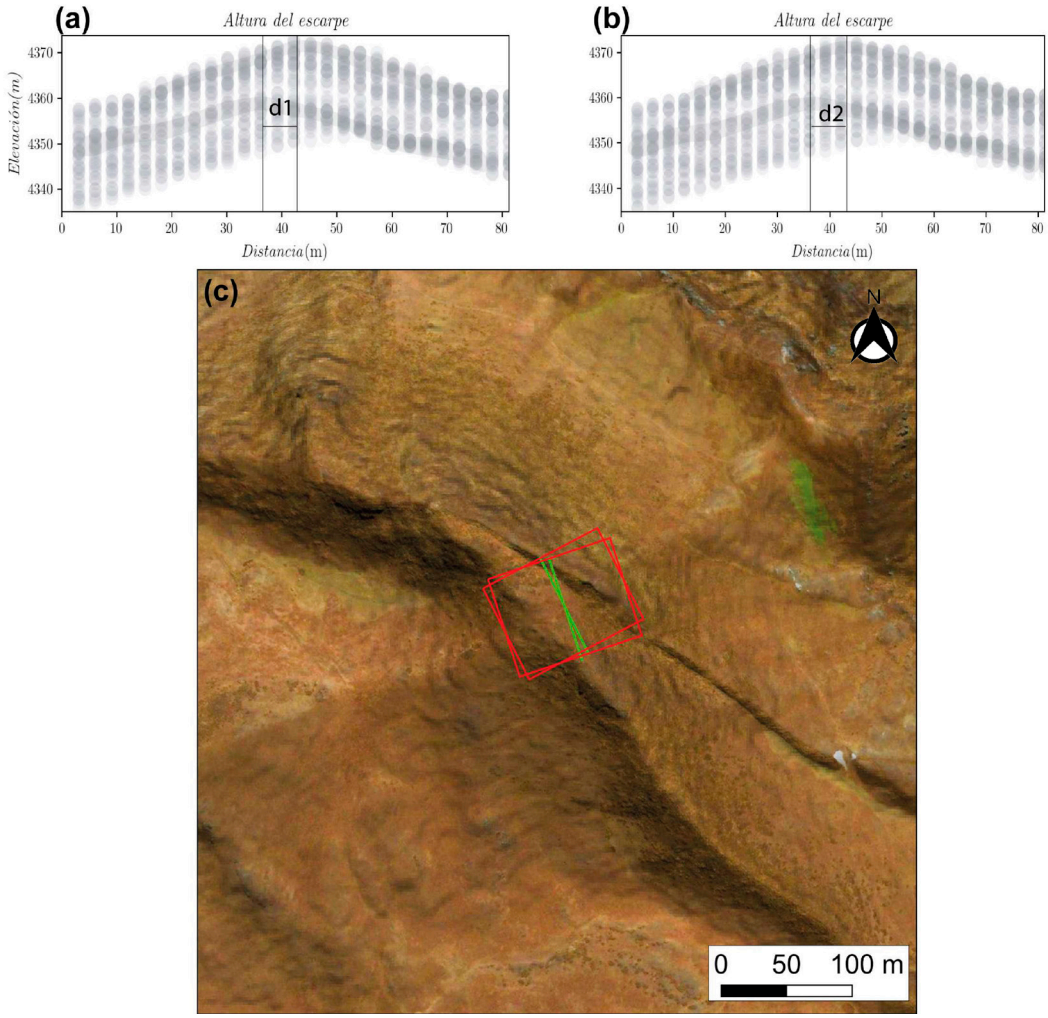


Figura 4.19 Sector Cerro Atlas (h2 en figura 4.6), medida del desplazamiento transcurrente con el uso de *Swath Profile*; en a) y b) se observan datos de elevación ploteados en un gráfico *elevación* vs *distancia*, donde se observan tonos oscuros por la acumulación de datos, las superficies convexas representan los lineamientos desplazados. (a) *Swath Profile* medido transversalmente al lineamiento del bloque fijo con un desplazamiento horizontal de 18,8 m; (b) *Swath Profile* medido de forma transversal al lineamiento del bloque desplazado con un desplazamiento horizontal de 19,9 m; (c) lineamiento desplazado horizontalmente por falla; las líneas de color verde representan los perfiles transversales a los drenajes desplazados, tanto del bloque desplazado como del bloque fijo; las líneas de color rojo muestran el área donde se realizó el *Swath Profile* (elaboración propia).

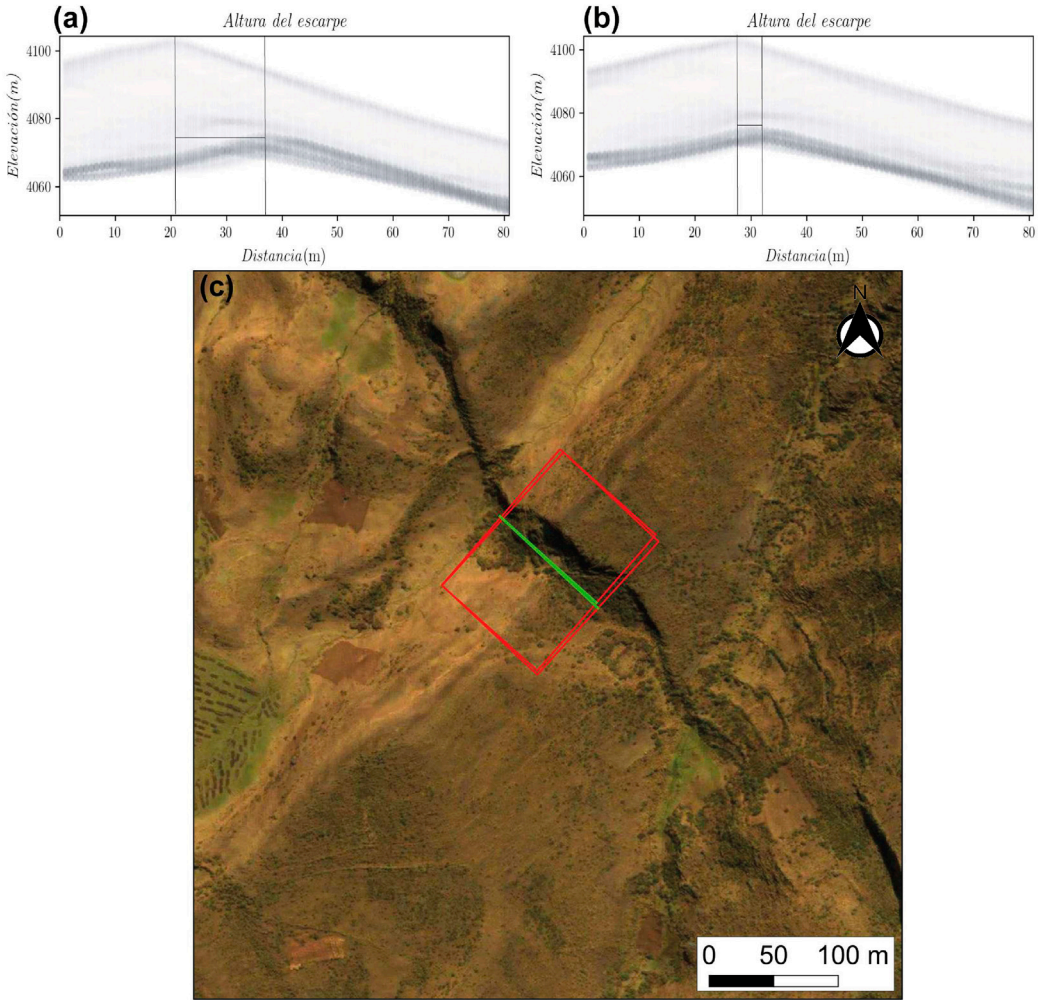


Figura 4.20 Sector Chincacocha (h3 en figura 4.6), medida del desplazamiento transcurrente con el uso de *Swath profile*; en a) y b) se observan datos de elevación ploteados en un gráfico elevación vs distancia, donde los tonos oscuros representan la acumulación de datos, con superficies tanto del bloque fijo como del bloque desplazado. (a) *Swath Profile* medido transversalmente a la morrena del bloque fijo con un desplazamiento horizontal de 19 m, (b)*Swath Profile* medido transversalmente a la morrena de bloque desplazado con un desplazamiento horizontal de 16,9 m; (c) morrena con un claro escarpe de falla, producto de un desplazamiento vertical por falla; las líneas verdes muestran los perfiles transversales a las morrenas del bloque desplazado y del bloque fijo; las líneas rojas muestran el área donde se realizó el *Swath Profile* (elaboración propia).

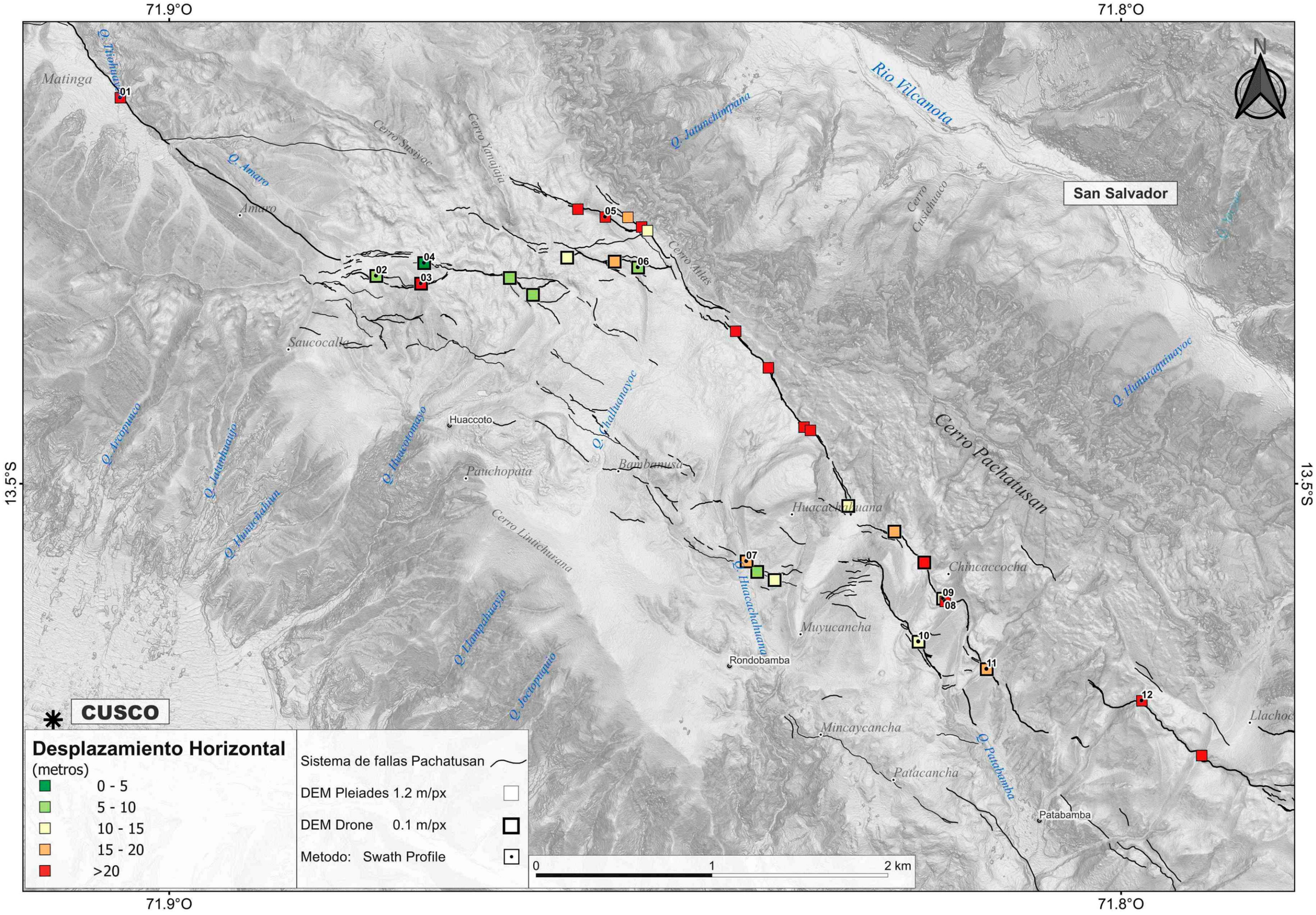


Figura 4.21 Mapa morfoestructural con medidas de desplazamientos horizontales. Se observan desplazamientos mayores a 20 m en los trazos de falla principal. Asimismo, se observan desplazamientos menores a 15 m en la zona central donde se distribuye la deformación (elaboración propia).

Desplazamiento Vertical

En la zona de estudio, los escarpes de falla normal son claramente visibles (fotografía 4.4); sin embargo, para cuantificar la deformación fue necesario utilizar modelos de elevación digital DEM *pleiades* y DEM de alta resolución generados con *Drone*.

Se realizaron 201 medidas de *Swath profile*, 142 se generaron sobre DEM de *Drone* y 59 sobre DEM *Pleidaes*. Las medidas de altura de escarpe y sus coordenadas se encuentran en el apéndice Capitulo A (figura: C.2, C.3 y C.4).

Algunos trazos de falla aislados no se midieron, puesto que los escarpes de falla son menores a un metro y la resolución del DEM *Pleidades* sobre la que se trabaja es mucho mayor.

Fotografía 4.4 Morrenas y depósitos fluvioglaciares afectados por falla en el sector Huacoto con desplazamiento vertical de una altura de escarpe de 8,5 m (fotografía de campo tomada al este).

Los resultados de desplazamiento vertical muestran mayor offset vertical en los segmentos de falla ubicados en los extremos noroeste y sureste (figura 4.22 y figura 4.24), y una distribución de la deformación en el sector central, donde se observan escarpes de falla de 2 a 10 metros (figura 4.23), como se muestra en la figura 4.25.

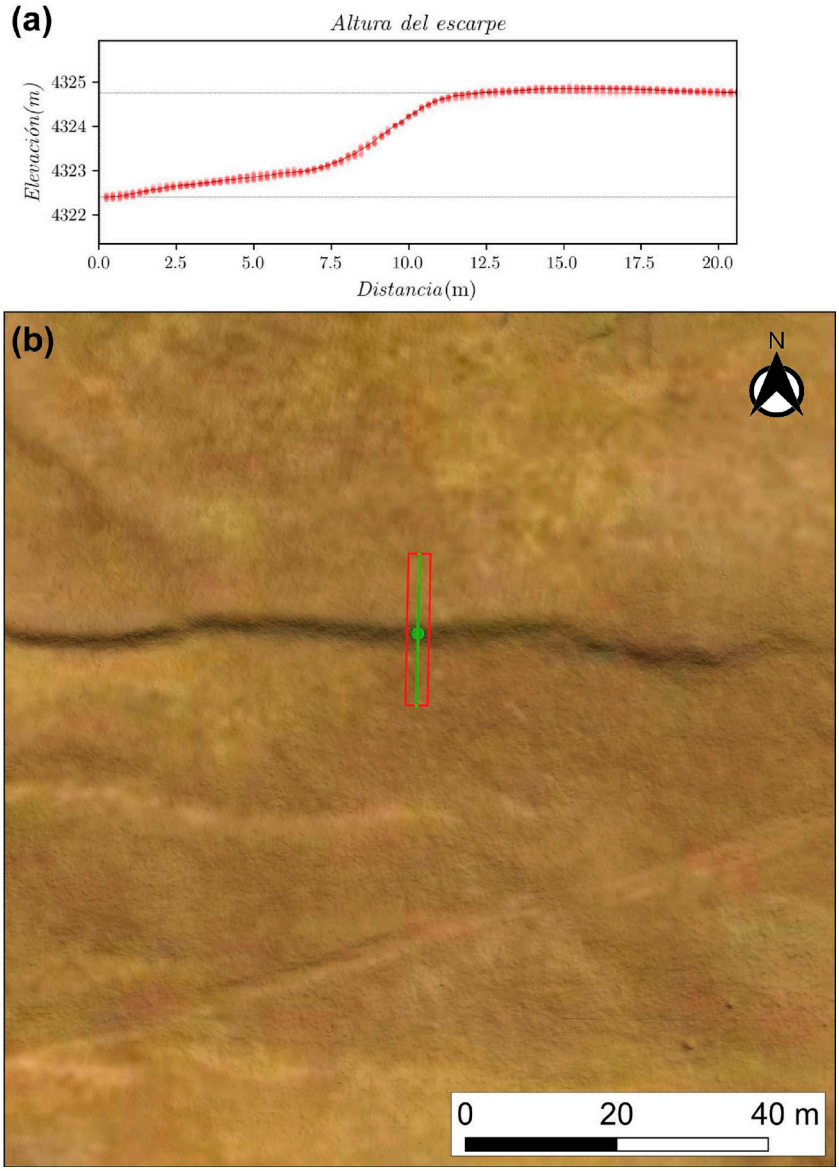


Figura 4.22 Sector Huacoto (v1 en figura 4.6), medida del desplazamiento vertical con el uso de *Swath Profile* (a) datos de elevación ploteados en un gráfico *elevación* vs *distancia*, con acumulación de datos en puntos de color rojo, con superficies desplazadas como el escarpe de falla y desplazamiento vertical de 2,3 m; (b) escarpe de falla sobre un depósito fluvioglaciar en la zona de deformación distribuida; la línea verde representa el perfil transversal al trazo de falla; las líneas de color rojo representan el área donde se generó el *Swath Profile* (elaboración propia).

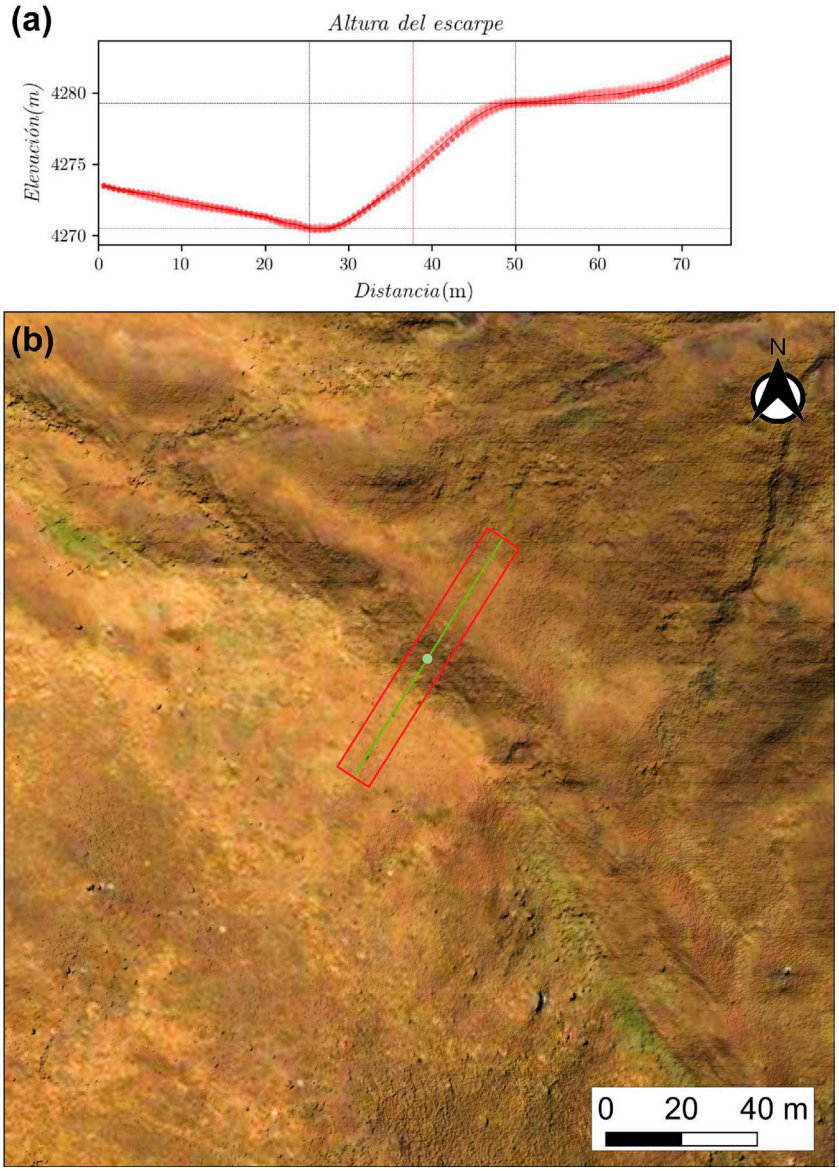


Figura 4.23 Sector Cerro Atlas (v2 en figura 4.6), medida del desplazamiento normal con el uso de *Swath profile*; (a) datos de elevación ploteados en un gráfico elevación vs distancia, con una acumulación de datos, representados con puntos de color rojo, con superficies desplazadas como el escarpe de falla y un desplazamiento vertical de 10,5 m; (b) escarpe de falla sobre un depósito fluvioglaciar en el trazo de falla principal, representada por la línea verde, con perfil transversal al trazo de falla; las líneas de color rojo representan el área donde se generó el *Swath Profile* (elaboración propia).

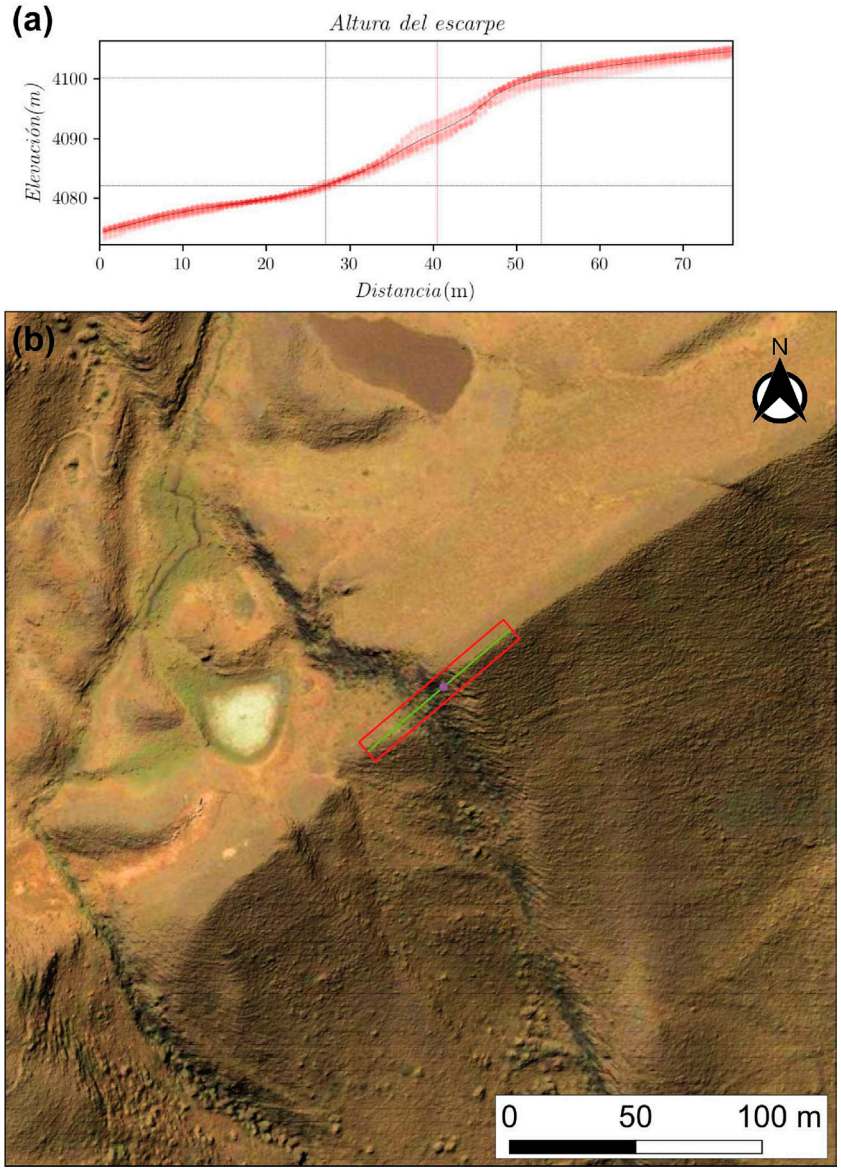


Figura 4.24 Sector Mincaycancha (v3 en figura 4.6), medida del desplazamiento normal con el uso de *Swath profile*; (a) datos de elevación ploteados en un gráfico *elevación* vs *distancia*, con una acumulación de datos, representados en puntos de color rojo, con superficies desplazadas, como el escarpe de falla, con un desplazamiento vertical de 28,5 m; (b) escarpe de falla sobre un depósito morrénico en el trazo de falla principal; la línea verde representa el perfil transversal al trazo de falla, las líneas de color rojo representan el área donde se generó el *Swath Profile* (elaboración propia).

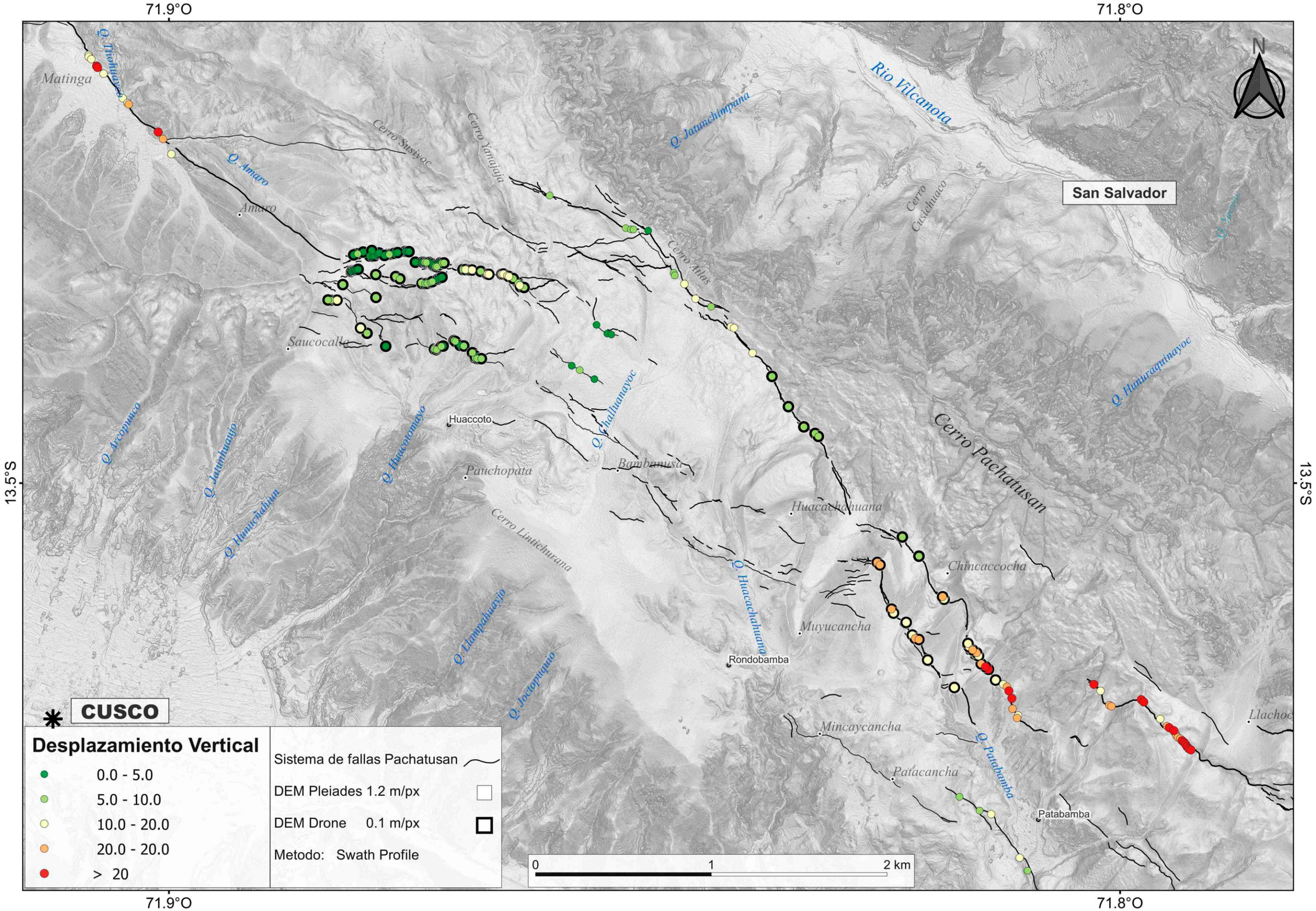


Figura 4.25 Mapa morfoestructural con medidas de desplazamientos verticales. Se observan desplazamientos mayores a 20 m en los trazos de falla principal. Asimismo, se observan desplazamientos menores a 10 m en la zona central donde se distribuye la deformación (elaboración propia).

4.3.3 Estilo de deformación

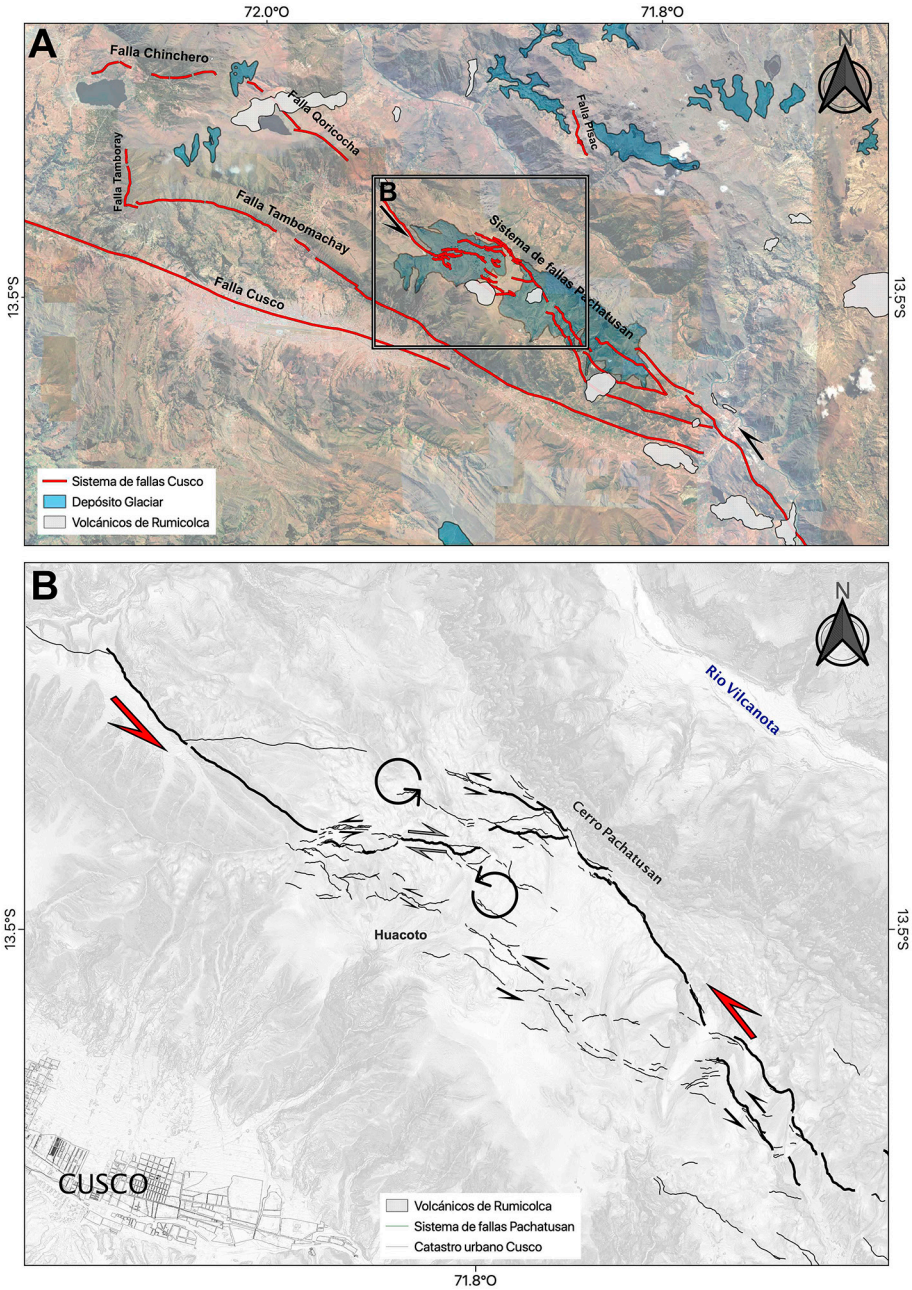


Figura 4.26 Modelo morfoestructural del Sistema de Fallas Pachatusan (A) en líneas rojas el Sistema de Fallas Cusco (recuadro B) depósitos glaciares afectados por el Sistema de Fallas Pachatusan, a lo largo de él los volcánicos de Rumicolca; (B) comportamiento del Sistema de Fallas Pachatusan con una deformación sinestral-normal y, en la zona de mayor deformación, desplazamientos dextrales afectando depósitos glaciares (elaboración propia).

Las medidas obtenidas y la distribución de los trazos de falla muestran la configuración de un sistema transtensivo, donde el esfuerzo transcurrente predomina sobre el extensivo. En los mapas (figura 4.21 y figura 4.25), se muestran trazos de falla continuos en los extremos noroeste y sureste, con desplazamientos verticales y horizontales, predominantes sobre los trazos de falla de la zona central. Esto sugiere que la deformación transcurrente y extensiva se distribuye en la zona central (Woodcock and Fischer, 1986).

Este estilo de deformación ha sido estudiado por Hempton and Dunne (1984) y Rodgers (1980) en sus modelos teóricos. En ellos, se indica que los offset verticales y horizontales son mayores en el escarpe de falla principal que en los escarpes de la zona de distribución de falla, donde se forman *bends*, echelones y trazos de falla a manera de sigmoides.

En la zona central, podemos ver depósitos glaciares con desplazamiento dextral, lo que sugiere un estilo de deformación de rotación de bloques, como está demostrado en los modelos de Burg (2015) y England and Molnar (1990) (figura 4.26) Además, sugerimos que el Sistema de Fallas Pachatusan es activo, por lo que la duplexación o formación de nuevos trazos de falla, en la zona de mayor deformación, no cesará, por lo menos hasta que la falla cese su actividad.

4.3.4 Modelo Geodinámico

El Sistema de Fallas Pachatusan afecta depósitos cuaternarios glaciares y fluvioglaciares. Estas estructuras tectónicas aparecen en la superficie como saltos o desniveles del terreno. Estas fallas se proyectan en profundidad cortando el macizo rocoso. Se sugiere que corta principalmente rocas triásico-jurásicas del grupo Mitu y comprende, en la base, conglomerados intercalados con areniscas y limonitas rojas fluviales (Formación Pisac), y, en la parte superior, intercalación de lavas, aglomerados y brechas volcánicas (Formación Pachatusan)

A partir del conocimiento del estilo de deformación, proponemos un modelo conceptual, que muestra la relación de los afloramientos volcánicos presentes a lo largo y ancho de la zona de deformación del sistema de fallas Pachatusan. Además, sugerimos que el ascenso volcánico fue favorecido por las zonas de debilidad generadas por las fallas como zonas de dilatación producto del movimiento extensivo con una componente de rumbo, así como, lo muestra en su ejemplo von Hagke *et al*. (2019) (figura 4.27).

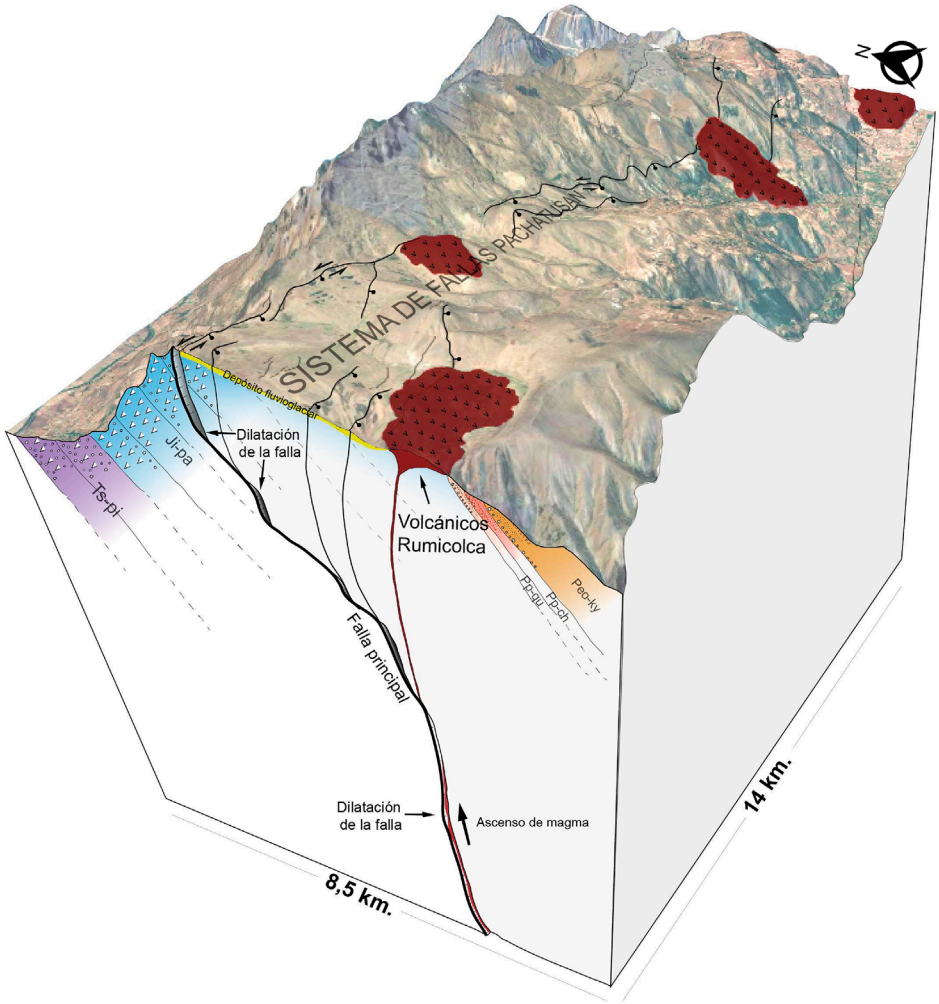


Figura 4.27 Modelo conceptual donde se muestra la relación de los volcánicos de Rumicolca con el Sistema de Fallas Pachatusan. Se observa un comportamiento transtensivo de las fallas con apertura o dilataciones cerca de la superficie y en profundidad, debido al desplazamiento oblicuo de la falla. Aparentemente, los fluidos volcánicos aprovecharon estas zonas de debilidad para su ascenso a la superficie (elaboración propia).

CAPÍTULO V
ANÁLISIS PALEOSISMOLÓGICO

5.1 INTRODUCCIÓN

La paleosismología es un método moderno que estudia los terremotos del pasado, lo cual involucra la geología y la sismología (Meghraoui and Atakan, 2014) California, Turkey, Italy. En tal sentido, estudia los efectos producidos por la deformación de fallas activas, como las sismitas, la licuefacción de suelos y otros efectos de la deformación sísmica (McCalpin, 1996).

La paleosismología añade información a los datos de ruptura en zonas de fallamiento activo, contribuyendo significativamente al estudio de la ocurrencia de terremotos relacionados a procesos tectónicos, así como al ciclo sísmico que implica un desplazamiento acumulativo (Meghraoui and Atakan, 2014 California, Turkey, Italy; Yeats *et al*., 1997).

El Sistema de Fallas Pachatusan no cuenta con información paleosismológica; sin embargo, existen registros históricos, documentados por personas, con datos de víctimas y daños de infraestructura en la región del Cusco (Silgado, 1978).

En este trabajo, presentamos un estudio paleosismológico del Sistema de Fallas Pachatusan, ubicado al SE de la ciudad del Cusco, con una tendencia en el azimut de las fallas NO-SE. A partir de este estudio, podremos conocer la tasa de desplazamiento, las paleomagnitudes y el tiempo de recurrencia de fallas activas (Rao *et al*., 2015).

La metodología de trabajo consistió en la interpretación estratigráfica detallada de una trinchera y su reconstrucción esquemática, desarrollada con ayuda de los resultados de las dataciones.

A partir de este análisis, se identificaron 4 eventos sísmicos producidos durante el Holoceno, con magnitudes que varían entre 6.18 a 6.57, así como con un intervalo de recurrencia de años entre cada evento.

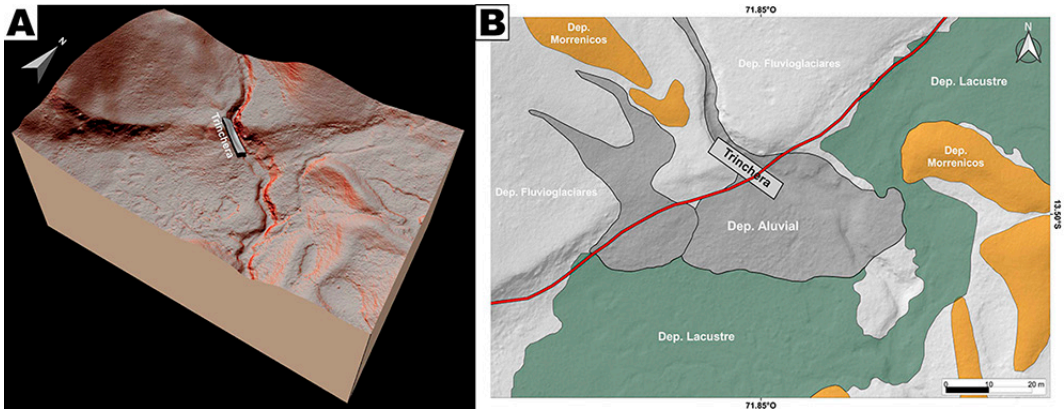


Figura 5.1 Ubicación de la trinchera paleosismológica (A) ubicación de la trinchera con respecto al escarpe de falla, el bloc diagrama realizado en base un Dem de drone de 8cm/px; (B) mapa con la ubicación de la trinchera con respecto a los depósitos cuaternarios (elaboración propia)

5.2 METODOLOGÍA

5.2.1 Selección de la zona

La selección de un lugar adecuado para la excavación de la trinchera es importante, puesto que esta elección determinará la calidad de información paleosismológica que se obtenga. Para lograr tal fin, las imágenes satelitales y el cartografiado geomorfológico ayudan a identificar zonas potenciales que, posteriormente, son identificadas en campo (figura 5.1).

Además de excavar en la zona de falla, se requiere de otros criterios, como una exposición sedimentaria favorable para recabar paleoeventos en la trinchera o un acceso adecuado a la zona.

Fotografía 5.1 Zona de la trinchera antes de su excavación (fotografía de campo con vista al oeste)

5.2.2 Logística

Tras la selección de la zona, uno de los requisitos obligatorios es obtener los permisos de excavación respectivos, tanto de los propietarios de las tierras como de las autoridades administrativas.

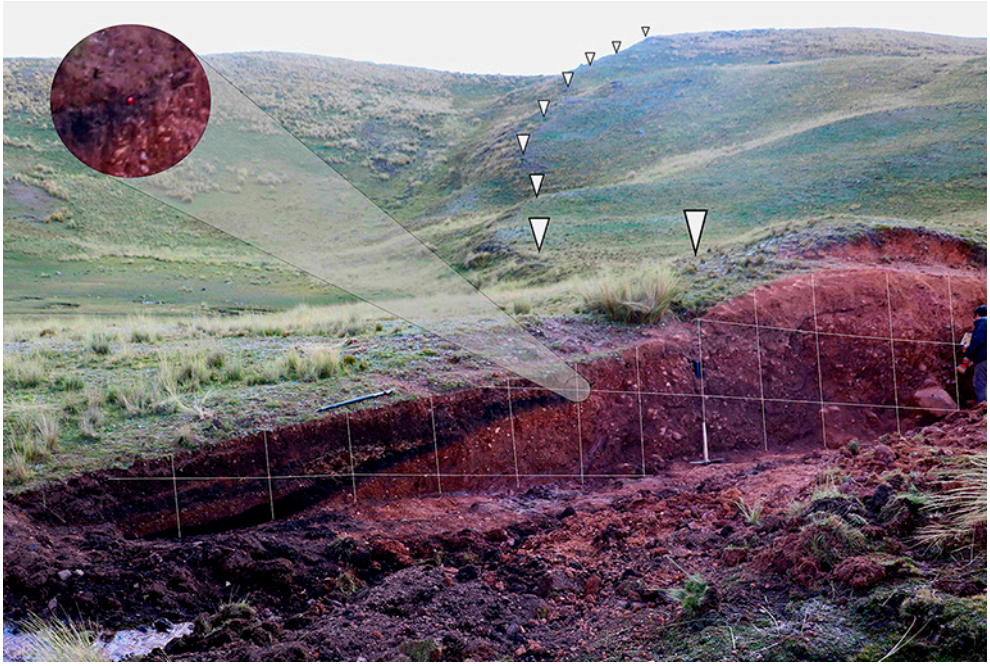
En el caso presente, los permisos fueron otorgados por las juntas locales del centro poblado de Huacoto, quienes cooperaron con el trabajo que realizamos. Además, se contrató mano de obra de algunas personas de la localidad para ayudar en las labores de excavación y preparación de la trinchera.

5.2.3 Excavación y preparación

El proceso de excavación depende de varios factores como el tipo de material de la trinchera, el ancho de deformación, la profundidad, la estabilidad de la trinchera y el estilo de trabajo (Akyüz *et al*., 2014)

En este caso, la orientación de la trinchera se hizo transversal al trazo de falla, la excavación se realizó haciendo uso de picos y palas (fotografía 5.2). La preparación consiste en la limpieza de las paredes de la trinchera; cabe resaltar que la excavación de la trinchera se realizó aprovechando el corte del terreno, producto de la incisión de un drenaje, por ende, la trinchera excavada consiste solo de una pared. Posteriormente, se realizó el engrillado haciendo uso de clavos rojos formando una cuadricula de 1m x 1m, nivelados vertical como horizontalmente.

Fotografía 5.2 Excavación de la trinchera paleo sismológica (fotografía de campo)



Fotografía 5.3 Engrillado de trinchera paleosismológica y en el círculo los clavos colocados (fotografía de campo con vista al oeste)

5.2.4 Registro y muestreo

El registro de trincheras nos brinda información clave relacionada con la estratigráfica y las estructuras de deformación (Akyüz *et al*., 2014), según la composición, la textura, el ambiente de sedimentación y la continuidad lateral.

El registro de evidencia paleosismológica se realizó en dos etapas. La primera etapa consistió en el proceso manual en campo posterior al engrillado (figura 5.2) que implicó el uso de hojas cuadriculadas y/o tabletas donde se guarda la descripción estratigráfica. La segunda etapa se realizó en gabinete donde se utilizó una foto mosaico de la trinchera.

La descripción de la trinchera estratigráfica consta del reconocimiento de facies estratigráficas. Considerando que estas pueden estar deformadas y/o desplazadas, los niveles que sellan estas facies deformadas representan eventos o paleo terremotos. Las facies son muestreadas cuidadosamente evitando su contaminación con otros sedimentos aledaños o agentes externos. Posteriormente, estas muestras se llevan al laboratorio para su análisis y datación (fotografía 5.4).

Fotografía 5.4 Muestreo de sedientos para datación (fotografía de campo)

5.2.5 Datación de muestras

La datación de las muestras se realizó en el laboratorio Beta Analitic USA, el método de datación utilizada es por espectrometría con aceleradores de masa, ya que se realizó el muestreo de sedimento con contenido orgánico, además de otras muestras netamente orgánicas como raíces soterradas.

Las dataciones del acelerador con espectrometría de masas C14 (AMS C14) ofrece un método rápido de datación de eventos y materiales menores que 50000 años, el desarrollo de esta técnica permite realizar las dataciones con menos de 1 gramo de C extraído de diferentes materiales como: carbón vegetal, plantas, polen, hueso, suelo y sedimento palustre, así como corales, espeleotemas, travertinos, foraminíferos, conchas y moluscos.

5.2.6 Construcción de orto mosaico

En la etapa de campo se tomaron fotos de la pared de la trinchera, con un traslape de más 70 % entre cada foto.

Se tomaron 274 fotografías con resolución 20 Mpx, las cuales se procesaron utilizando el software Agisoft Photoscan para así obtener de un orto mosaico, esto nos permite realizar medidas de potencia de desplazamientos, potencia de facies y deformaciones estructurales medibles.

El procesamiento de estas fotografías es el mismo utilizado para crear orto mosaico de fotografías aéreas mencionado en capítulo 4 (figura 5.2).

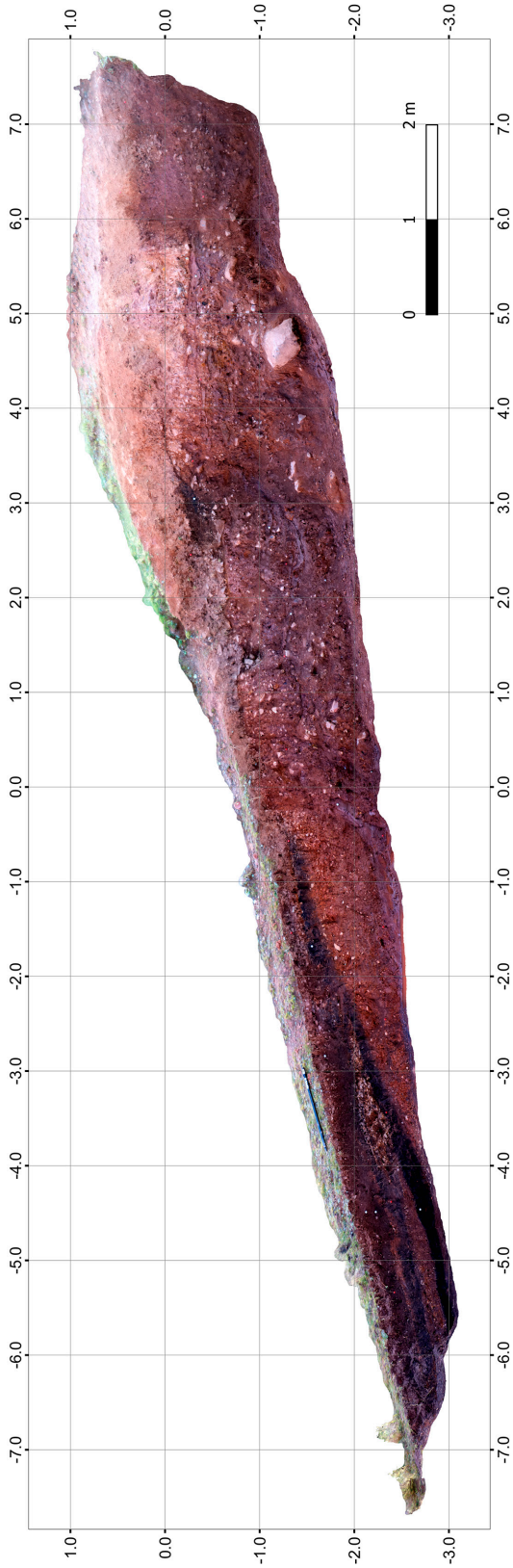


Figura 5.2 Ortomosaico de fotografías de la trinchera paleosismológica excavada (elaboración propia)

5.2.7 Reconstrucción estratigráfica

La zona de estudio se encuentra en un ambiente fluvioglaciar modelado por actividad tectónica reciente. Las fallas se presentan en superficie como desniveles (escarpes). Contemporáneamente, se generan derrumbes (cuñas coluviales) depositados al pie del escarpe. De igual forma, la acomodación favorable del relieve ante la deformación permite la aparición de charcos o pequeñas lagunas (*sagponds*), así como la deformación y creación de nuevos drenajes.

Estos factores morfotectónicos, acompañados de la variación climática, controlan la deposición de facies sedimentarias. Así, por ejemplo, en los *sagponds*, observamos sedimentaciones palustres de alto contenido orgánico; mientras que, al pie de la falla, observamos derrumbes cosísmicos (cuñas coluviales) que marcan eventos sísmicos pasados.

La reconstrucción estratigráfica requiere la descripción detallada de facies sedimentarias, puesto que muchas muestran la deformación por actividad sismotectónica.

5.2.8 Cronología de eventos

A lo largo del tiempo, se van formando diferentes niveles sedimentarios que indican diversas etapas cronológicas de eventos sísmicos (figura 5.4). En este trabajo, se realizó la reconstrucción cronológica mediante modelos esquemáticos en tres dimensiones que nos permitieron mostrar la relación entre los eventos sísmicos y los procesos de sedimentación.

5.2.9 Cálculo de paleomagnitudes

Para el cálculo de la magnitud-momento correspondiente a cada evento sísmico, se utilizó la fórmula empírica propuesta por Wells and Coppersmith (1994). Para la aplicación de esta fórmula, se han considerado los valores de los desplazamientos hallados durante la reconstrucción de cada trinchera.

Equation*	Slip Type†	Number of Events	Coefficients and Standard Errors		Standard Deviation	Correlation Coefficient	Magnitude Range	Displacement Range (km)
			a(sa)	b(sb)	s	r		
$\mathbf{M} = a + b * \log(\mathrm{MD})$	SS	43	6.81(0.05)	0.78(0.06)	0.29	0.90	5.6 to 8.1	0.01 to 14.6
	{R‡	*21*	*6.52(0.11)*	*0.44(0.26)*	*0.52*	*0.36*	*5.4 to 7.4*	*0.11 to 6.5*}
	N	16	6.61(0.09)	0.71(0.15)	0.34	0.80	5.2 to 7.3	0.06 to 6.1
	All	80	6.69(0.04)	0.74(0.07)	0.40	0.78	5.2 to 8.1	0.01 to 14.6
$\log(\mathrm{MD}) = a + b * \mathbf{M}$	SS	43	−7.03(0.55)	1.03(0.08)	0.34	0.90	5.6 to 8.1	0.01 to 14.6
	{R	*21*	*−1.84(1.14)*	*0.29(0.17)*	*0.42*	*0.36*	*5.4 to 7.4*	*0.11 to 6.5*}
	N	16	−5.90(1.18)	0.89(0.18)	0.38	0.80	5.2 to 7.3	0.06 to 6.1
	All	80	−5.46(0.51)	0.82(0.08)	0.42	0.78	5.2 to 8.1	0.01 to 14.6
$\mathbf{M} = a + b * \log(\mathrm{AD})$	SS	29	7.04(0.05)	0.89(0.09)	0.28	0.89	5.6 to 8.1	0.05 to 8.0
	{R	*15*	*6.64(0.16)*	*0.13(0.36)*	*0.50*	*0.10*	*5.8 to 7.4*	*0.06 to 1.5*}
	N	12	6.78(0.12)	0.65(0.25)	0.33	0.64	6.0 to 7.3	0.08 to 2.1
	All	56	6.93(0.05)	0.82(0.10)	0.39	0.75	5.6 to 8.1	0.05 to 8.0
$\log(\mathrm{AD}) = a + b * \mathbf{M}$	SS	29	−6.32(0.61)	0.90(0.09)	0.28	0.89	5.6 to 8.1	0.05 to 8.0
	{R	*15*	*−0.74(1.40)*	*0.08(0.21)*	*0.38*	*0.10*	*5.8 to 7.4*	*0.06 to 1.5*}
	N	12	−4.45(1.59)	0.63(0.24)	0.33	0.64	6.0 to 7.3	0.08 to 2.1
	All	56	−4.80(0.57)	0.69(0.08)	0.36	0.75	5.6 to 8.1	0.05 to 8.0

*MD—maximum displacement (m); AD—average displacement (M).
†SS—strike slip; R—reverse; N—normal.
‡Regressions for reverse-slip relationships shown in italics and brackets are not significant at a 95% probability level.

Figura 5.3 Tabla comparativa de desplazamiento y magnitud-momento (Wells and Coppersmith, 1994)

5.2.10 Cálculo del intervalo de recurrencia

El cálculo del intervalo de recurrencia es un parámetro importante para el estudio de peligros naturales como los terremotos (Schnellmann *et al*., 2006). Para llevarlo a cabo, necesitamos conocer la edad de cada evento sísmico. Por tal razón, nos basamos en la idea de que cada evento tiene una edad marcada según las etapas de sedimentación y/o depositación. Así, tenemos como ejemplos la formación de depósitos cosísmicos, como las cuñas coluviales, la formación de *sagpond* y el inicio de la sedimentación, así como la sedimentación de un depósito y su posterior deformación por falla.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Dataciones por Radiocarbono AMS C14

Tabla 5.1

Resultado de las dataciones por radio carbono C14

Nº	Código	Edad (Cal AD)	Edad (Cal BP)	Edad (S/Cal)	Material analizado
1	GA-50-18-01-PT	3196 - 3010 cal BC	5145 - 4959 cal BP	4510 +/- 30 BP	Sedimento orgánico
2	GA-50-18-02-PT	54 - 230 cal AD	1896 - 1720 cal BP	1940 +/- 30 BP	Sedimento orgánico
3	GA-50-18-03-PT	770 - 900 cal AD	1180 - 1050 cal BP	1240 +/- 30 BP	Sedimento orgánico
4	GA-50-18-04-PT	173 cal BC - 24 cal AD	2122 - 1926 cal BP	2110 +/- 30 BP	Sedimento orgánico
5	GA-50-18-05-PT	1876 - 1948 cal AD	74 - 2 cal BP	80 +/- 30 BP	Material vegetal
6	GA-50-18-09-PT	1133 - 927 cal BC	3082 - 2876 cal BP	2930 +/- 30 BP	Sedimento orgánico

5.3.2 Descripción Estratigráfica de la trinchera Pachatusan

Unidad (Cñ1)

Está compuesta de clastos soportados en una matriz arenosa con contenido orgánico, con un porcentaje de 60 %-40 % clasto-matriz. Presenta clastos subangulosos de 9cm de diámetro en promedio y 28 cm del clasto mayor. Tiene una coloración marrón oscuro. Esta unidad fue muestreada para datación por AMS C14.

Unidad (Cñ2)

Está compuesta de clastos soportados en una matriz arenosa con un porcentaje de 60 %-40 % clasto-matriz. Presenta clastos subangulosos de 4 cm de diámetro en promedio. Tiene una coloración marrón clara.

Unidad (Lc3)

Este nivel está compuesto por sedimentos finos de origen lacustre con contenido orgánico. En la base de este depósito, encontramos nódulos de carbón, razón por la cual en la base aparece una coloración oscura que se aclara hacia el techo. Esta unidad fue muestreada para datación por AMS C14.

Unidad (Gr2)

Este nivel está compuesto principalmente de gravas soportadas en una matriz arenosa con una distribución 50 %-50 % de clasto-matriz. Presenta clastos subredondeados a subangulosos de 1.5 cm de diámetro en promedio. La coloración de este nivel es marrón claro. Presenta clastos con un nivel alto de oxidación.

Unidad (Pa1)

Material matriz soportado conformado por arena limosa con contenido orgánico. Este nivel presenta nódulos de carbón en el lugar donde se realizó el muestreo para su datación con AMS C14.

Unidad (Lc2)

Esta unidad está compuesta por sedimentos finos de origen lacustre con alto contenido orgánico. Presenta una coloración oscura típica. Este nivel está diferenciado de (Lc1), puesto que representa el nivel superior que se sedimenta sobre el depósito de canal (Cnl).

Unidad (Lc1)

Esta unidad está compuesta por sedimentos finos de origen lacustre con alto contenido orgánico. Presenta una coloración oscura característica de este tipo de sedimentos. Este nivel esta diferenciado, ya que constituye el nivel base de este cuerpo lacustre posteriormente erosionado por (Cnl).

Unidad (Gr1)

Esta unidad está conformada por gravas soportadas en una matriz arenosa con una distribución 80 %-20 % de clasto-matriz. Presenta clastos de subangulosos a subredondeados de 3 cm de diámetro en promedio, de 3 cm y 60 cm de diámetro en un clasto mayor. Presenta una coloración marrón amarillenta por el alto contenido de clastos oxidados.

Unidad (Cnl)

Esta unidad está compuesta principalmente de clastos soportados en una matriz arenosa con una distribución 70 %-30 % de clasto-matriz. Presenta clastos de arenisca con un diámetro promedio de 2 cm y un clasto mayor de 4 cm. Los clastos presentan esfericidad de subredondeados a subangulosos. La coloración de este nivel es pardo amarillenta por el alto contenido de clastos oxidados.

Unidad (Grv)

Este nivel está conformado de clastos soportados en una matriz limosa con una distribución 50 %-50 % de clasto y matriz. Presenta clastos subangulosos de 4 cm de diámetro promedio y 10 cm de diámetro mayor. Asimismo, presenta en pequeña proporción, clastos oxidados. Este nivel presenta una coloración pardo-clara.

Unidad (Lm1)

Esta unidad está conformada por arena de grano fino en la base y limo en el techo. Se presenta a manera de lentes interestratificados en un depósito morrénico (Mrr); tiene una coloración gris parduzca.

Unidad (Mrr)

Esta unidad está conformada por clastos soportados en una matriz limo-arenosa. Presenta distribución heterogénea de sus clastos y una proporción 60 %-40 % de clasto-matriz. Asimismo, posee clastos subredondeados a subangulosos con niveles de arena y limo (Lm1) interestratificados. Este nivel tiene una coloración marrón oscura.

Unidad (Lc)

Este nivel está compuesto por sedimentos finos de origen lacustre con alto contenido orgánico. Su estructura truncada sugiere que se trata de la sedimentación de un paleolago. Esta unidad fue muestreada para datación por AMS C14.

Unidad (Sgp)

Está compuesta principalmente por sedimento fino de origen lacustre con alto contenido orgánico. La morfología del depósito y el tipo de material sugieren que se trata de un sagpond. Presenta una coloración marrón oscura. Esta unidad fue muestreada para datación por AMS C14. Se observan algunos clastos de roca en la zona de falla posiblemente mezclados por el movimiento sísmico.

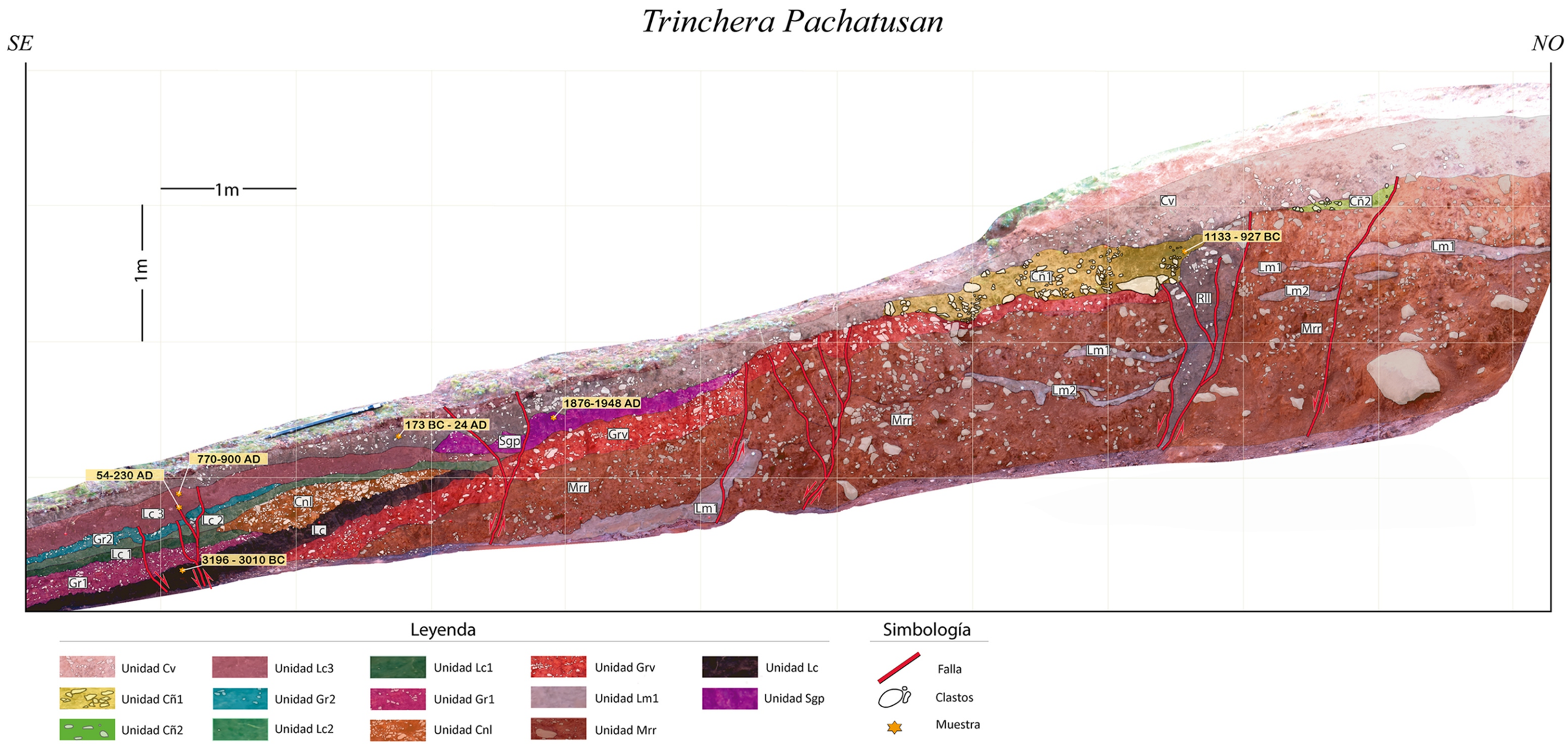


Figura 5.4 Foto interpretación de la trinchera paleosismológica Pachatusan (elaboración propia)

5.3.3 Deformación e interpretación paleo sismológica

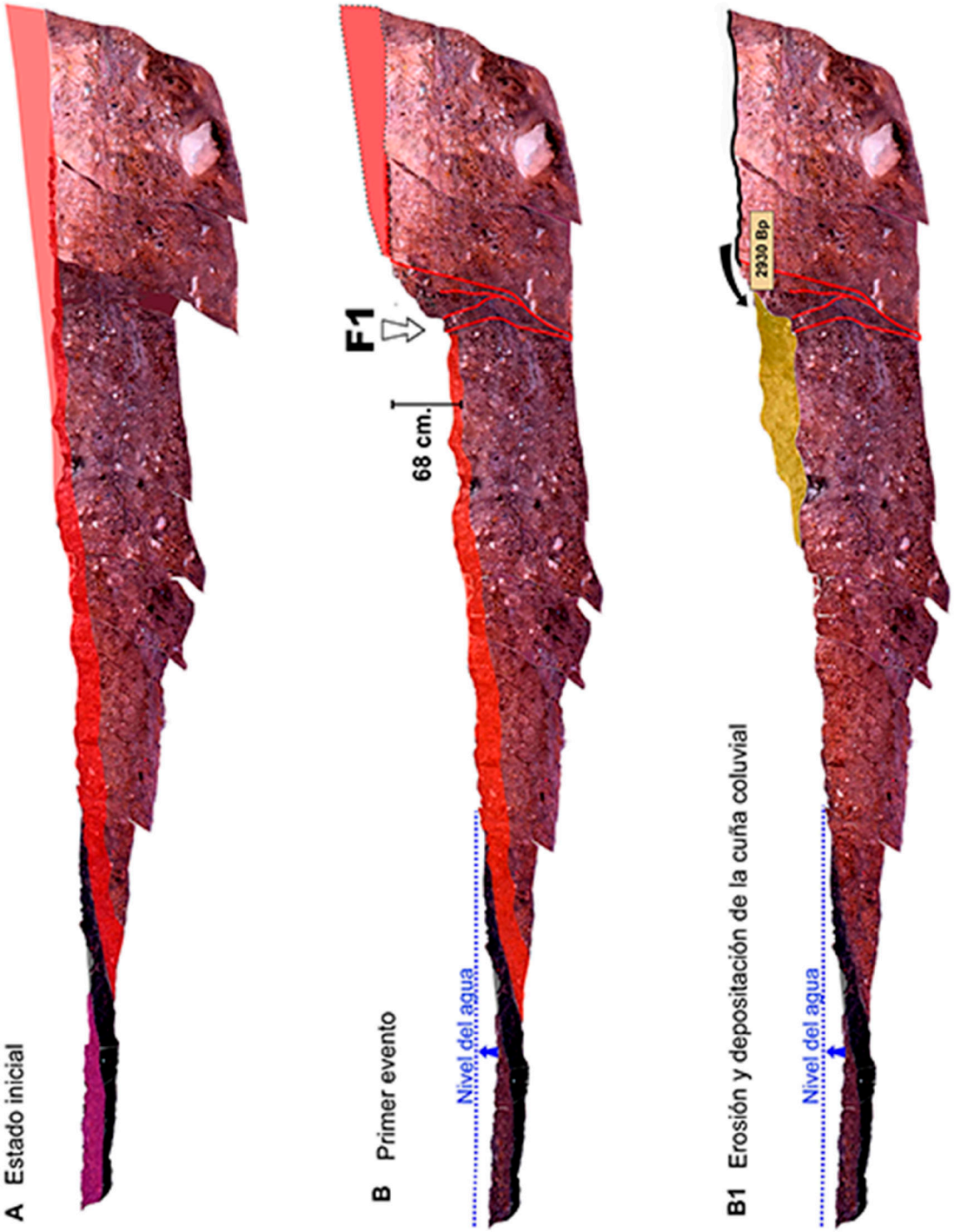


Figura 5.5 Reconstrucción paleosismológica de la trinchera en Pachatusan a partir del ortomosaico de fotografías (A) estado inicial de la trinchera; (B) primer evento que desplaza verticalmente 68 cm (elaboración propia).

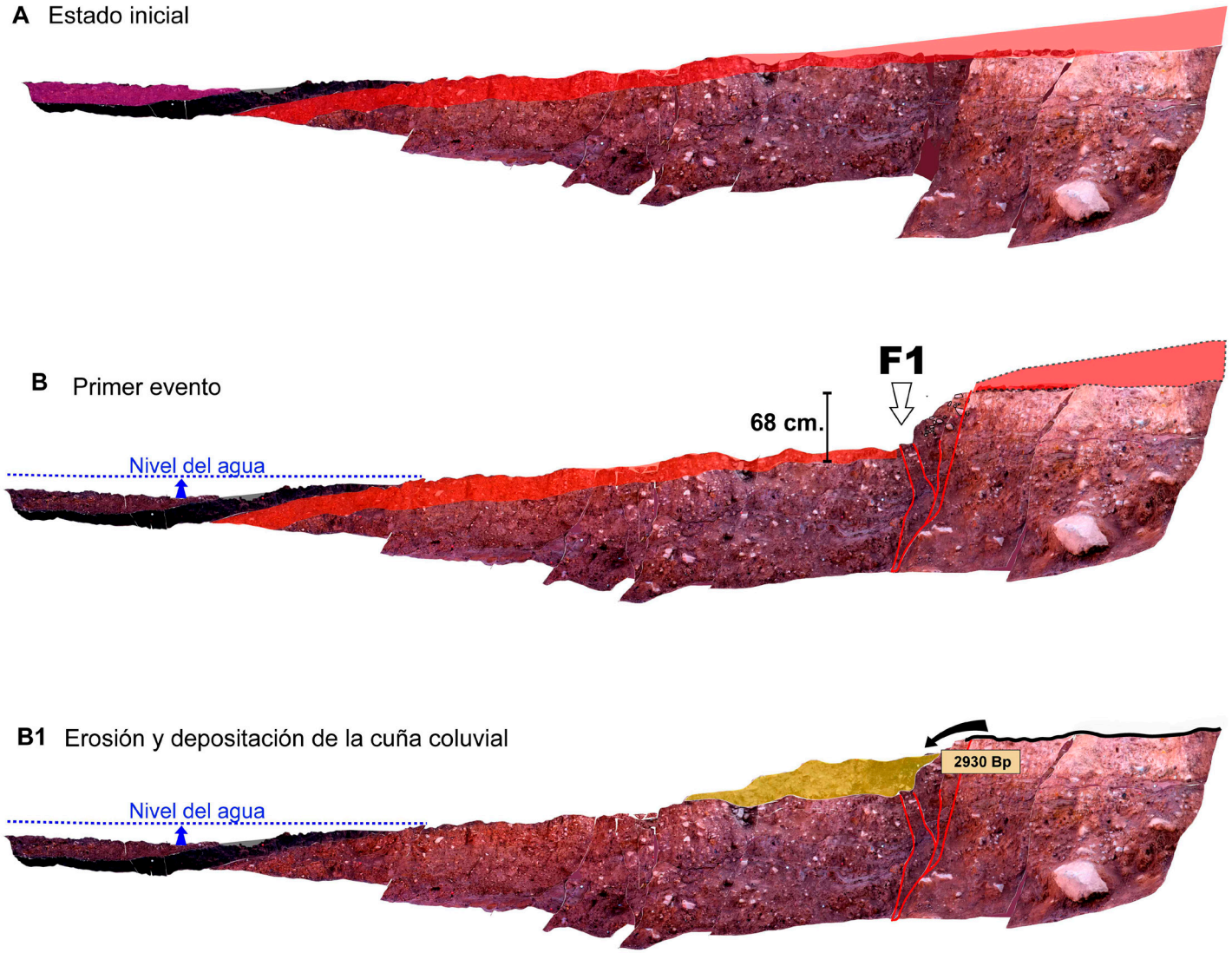


Figura 5.6 Reconstrucción paleosismológica de la trinchera en Pachatusan a partir del ortomosaico de fotografías. En S1, S2 y S3, observamos las etapas de sedimentación posteriores a la reactivación de F1 (elaboración propia).

Figura 5.7 Reconstrucción paleosismológica de la trinchera en Pachatusan a partir del ortomosaico de fotografías. En C, C1 y C2, tenemos la segunda reactivación F2 con un desplazamiento vertical de 12 cm, así como los procesos de erosión y sedimentación posteriores a la reactivación (elaboración propia).

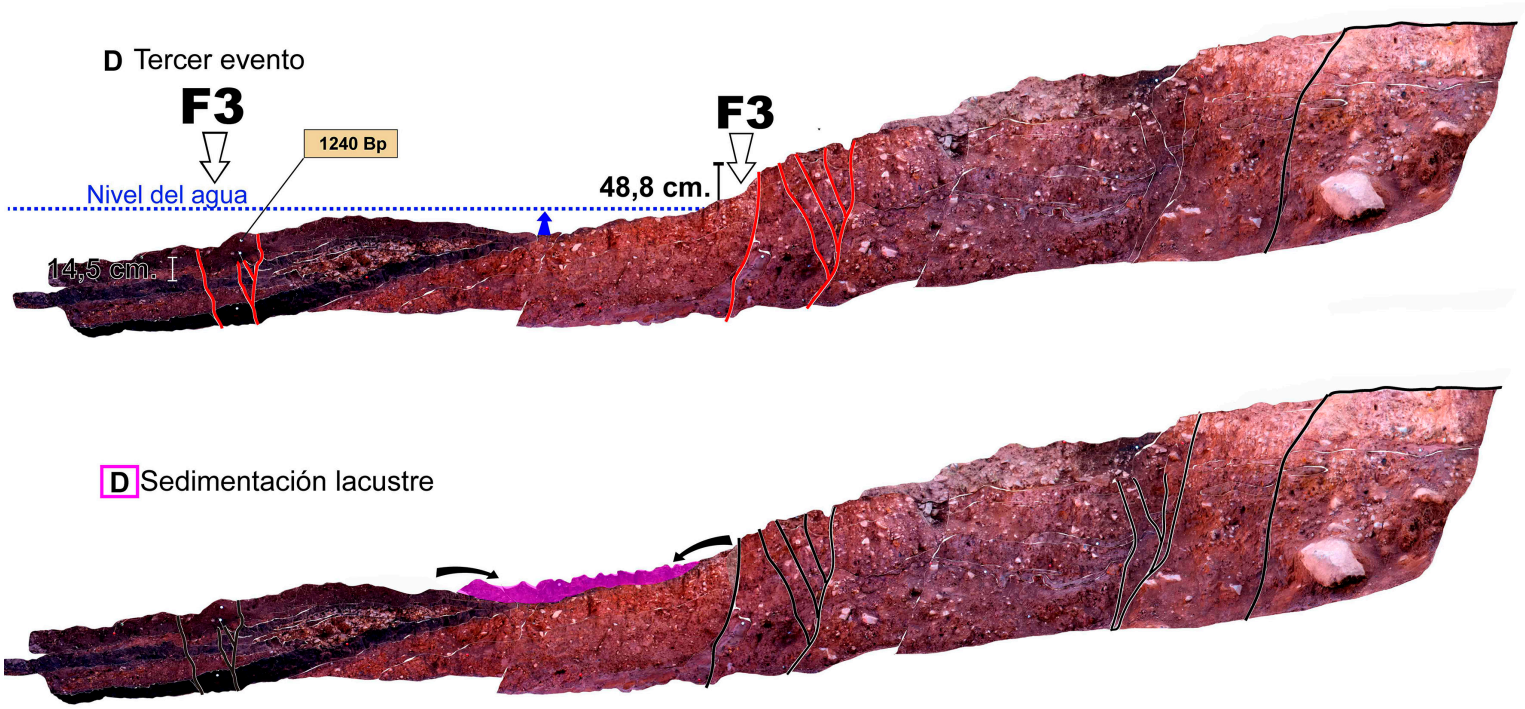


Figura 5.8 Reconstrucción paleosismológica de la trinchera en Pachatusan a partir del ortomosaico de fotografías. En D y D1, observamos la tercera reactivación F3 con un desplazamiento de 48 cm. Posterior a este evento, observamos la sedimentación de un *sagpond* (elaboración propia).

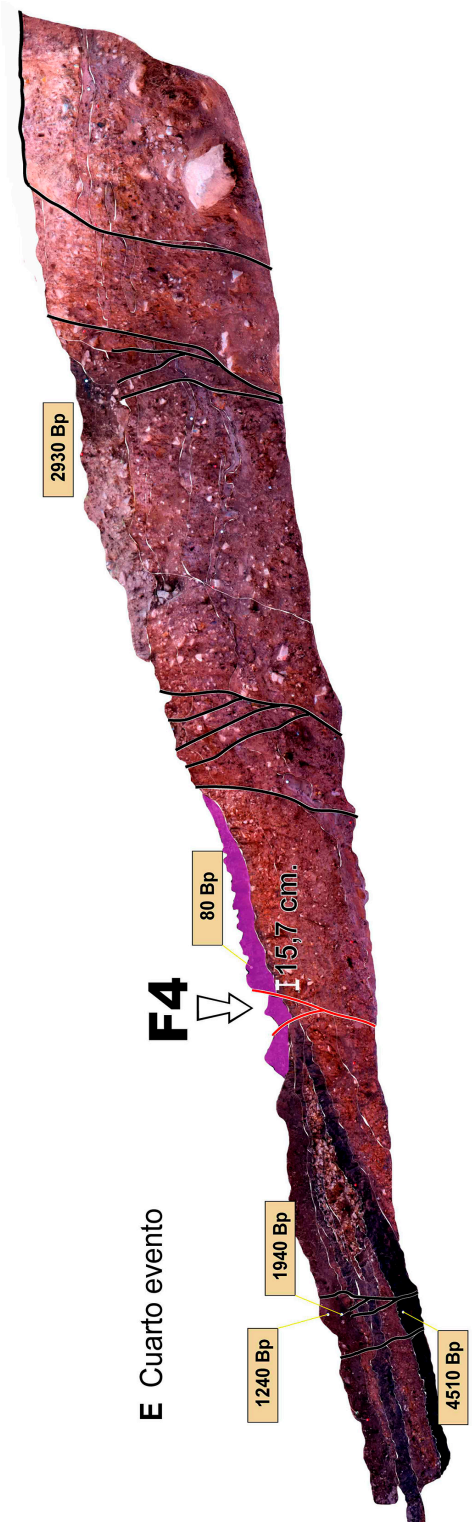


Figura 5.9 Reconstrucción paleosismológica de la trinchera en Pachatusan a partir del ortomosaico de fotografías. En E, tenemos la última reactivación con un desplazamiento vertical de 15,7 cm que deforma un depósito lacustre reciente (elaboración propia).

- En A, se muestra el estado inicial de la trinchera. Se lograron identificar 4 niveles estratigráficos. En la base, se observa un depósito morrénico con niveles interestratificados de arena limosa; sobre este, encontramos un nivel de gravas subangulosas soportadas en una matriz limo-arenosa que se encuentra resaltada en color rojo; encima, encontramos un nivel compuesto por sedimento lacustre de color negro que tiene una datación de 3196-3010 BC; erosionando este depósito lacustre, encontramos un nivel de grava soportada en una matriz limosa resaltada en color violeta (figura 5.5).
- En la figura B, se muestra el primer evento de deformación por falla con un desplazamiento vertical de 68 cm. La zona de falla presenta dilatación rellena de clastos. La estructura de la falla sugiere que existe un comportamiento transcurrente. Con línea entrepunteada de color azul, está representado el nivel de agua que ascendió producto de la caída del *hangingwall* (figura 5.5).
- En la figura B1, se observa erosión del *footwall* y la depositación de una cuña coluvial resaltada en color amarillo. La línea entrepunteada de color azul representa el nuevo nivel de agua que controla la sedimentación (figura 5.5).
- Las figuras S1, S2 y S3 representan las etapas de sedimentación posteriores a la deformación. En S1, se resalta en color verde la depositación de sedimentos lacustres. En S2, se muestra el aumento del nivel de sedimentación lacustre posteriormente erosionado por un canal de gravas finalmente cubierto por sedimento lacustre, como se observa en S3 (figura 5.6).
- En la figura C, se muestra un segundo evento de deformación por falla en el bloque *footwall* con un desplazamiento vertical de 12 cm. Esta caída genera basculamiento del *hangingwall* y ascenso del nivel del agua (figura 5.7).
- En la figura C1, se resalta en color verde la depositación de una cuña coluvial y la erosión del hanginwall. En respuesta al basculamiento del *hangingwall*, se deposita un nivel de gravas soportado en una matriz limosa que erosiona parte del nivel lacustre de la base (figura 5.7).
- En la figura C2, se observa sedimentación lacustre resaltada en color rosado. Este nivel presenta dataciones de 770-900 AD en el techo y 54-230 AD en la base. Las edades nos dan una diferencia de 700 años aproximadamente en 11 cm de sedimento. Estos datos nos dan una tasa de sedimentación de 0,15 mm/año. Además, se observa que el nivel de agua aún permanece alto (figura 5.7).
- En la figura D, se muestra un tercer evento con un desplazamiento vertical de 48,8 cm. Tomando en cuenta la tasa de sedimentación calculada en los depósitos lacustres, se sugiere una edad de reactivación anterior a 950 Bp. La estructura de la falla sugiere que también presenta deformación transcurrente. Además, vemos la reactivación de una falla antitética posterior a 1240 Bp y desplazamiento vertical de 14,5 cm. Esta presenta también un componente transcurrente que genera la deformación de los estratos en estructura de flor. La reactivación de estas fallas genera un relieve favorable para la formación y sedimentación de un *sagpond*. Este nivel esta resaltado en color violeta. En esta etapa, la acumulación de sedimentos lacustres es favorecida por una alta precipitación de 1,699 mm/año, registrada 1108 BP, y un decaimiento de la precipitación acumulada a 1,261 mm/año, registrada a 1078 BP (Thompson, 1998) (figura 5.8).
- En la figura F, se muestra la última reactivación de la falla con un desnivel vertical de 15,7 cm. Esta deforma el *sagpond* depositado posterior al tercer evento. Además, la estructura en "v" de la falla nos indica que está presente el componente transcurrente en la falla. Este nivel lacustre presenta una datación de 1876-1948 AD en el techo. Finalmente, tenemos como material de cobertura gravas con una matriz limo-arenosa que se está erosionando los niveles estratigráficos que se encuentran debajo (figura 5.9).

5.3.4 Cálculo de paleo magnitudes

En base a la interpretación paleosismológica, se logró identificar 4 eventos sísmicos, cuya magnitud sísmica se calculó utilizando la fórmula de Wells and Coppersmith (1994)

Tabla 5.2

Relación del desplazamiento y la magnitud sísmica por evento

Evento	AD (cm)	Magnitud (M)
F1	68.0	6.67
F2	12.0	6.18
F3	48.8	6.57
F4	15.7	6.25

Fuente: Elaboración propia

5.3.5 Magnitud máxima posible

Se lograron calcular 99 km de ruptura total en superficie (SRL). Aplicando la fórmula de Wells and Coppersmith (1994), obtenemos una magnitud máxima de 7.39 ante una reactivación del sistema de fallas Pachatusan.

$$M = a + b * \log(SRL)$$

$$M = 7.39$$

a = 5.08; b = 1.16; SRL = 99km (Wells and Coppersmith, 1994).

5.3.6 Intervalo de recurrencia

El intervalo de recurrencia de los eventos sísmicos se calculó en base a las dataciones de los depósitos sedimentarios cosísmicos posteriores al evento. La edad de una cuña coluvial para el primer evento F1, la edad del tope de sedimentación en un depósito lacustre (LC1) y el inicio de sedimentación del sagpond (SGP) para el tercer evento F3, se calcularon con la tasa de sedimentación hallada en depósitos lacustres (LC1) de 0.15 mm/año. Para el cuarto evento F4, se tomó en cuenta la edad del tope de sedimentación de (SGP), puesto que se trataba del nivel superior antes de la cobertura.

La edad del evento F1 y de la cuña coluvial (Cñ1) es de Cal BP. El tercer evento F3 está datado con una edad de BP. El cuarto evento F4 está datado según el tope de sedimentación de (SGP) con una edad de 80 ~ Cal BP.

El intervalo de tiempo entre los eventos recientes F4 y F3 es de años. El intervalo de tiempo entre el evento F3 y F1 es de años. Teniendo en cuenta que el evento intermedio F2 no se encuentra datado, se calcula un intervalo de recurrencia de los eventos F1, F2, F3 Y F4 de ~ 1000 años.

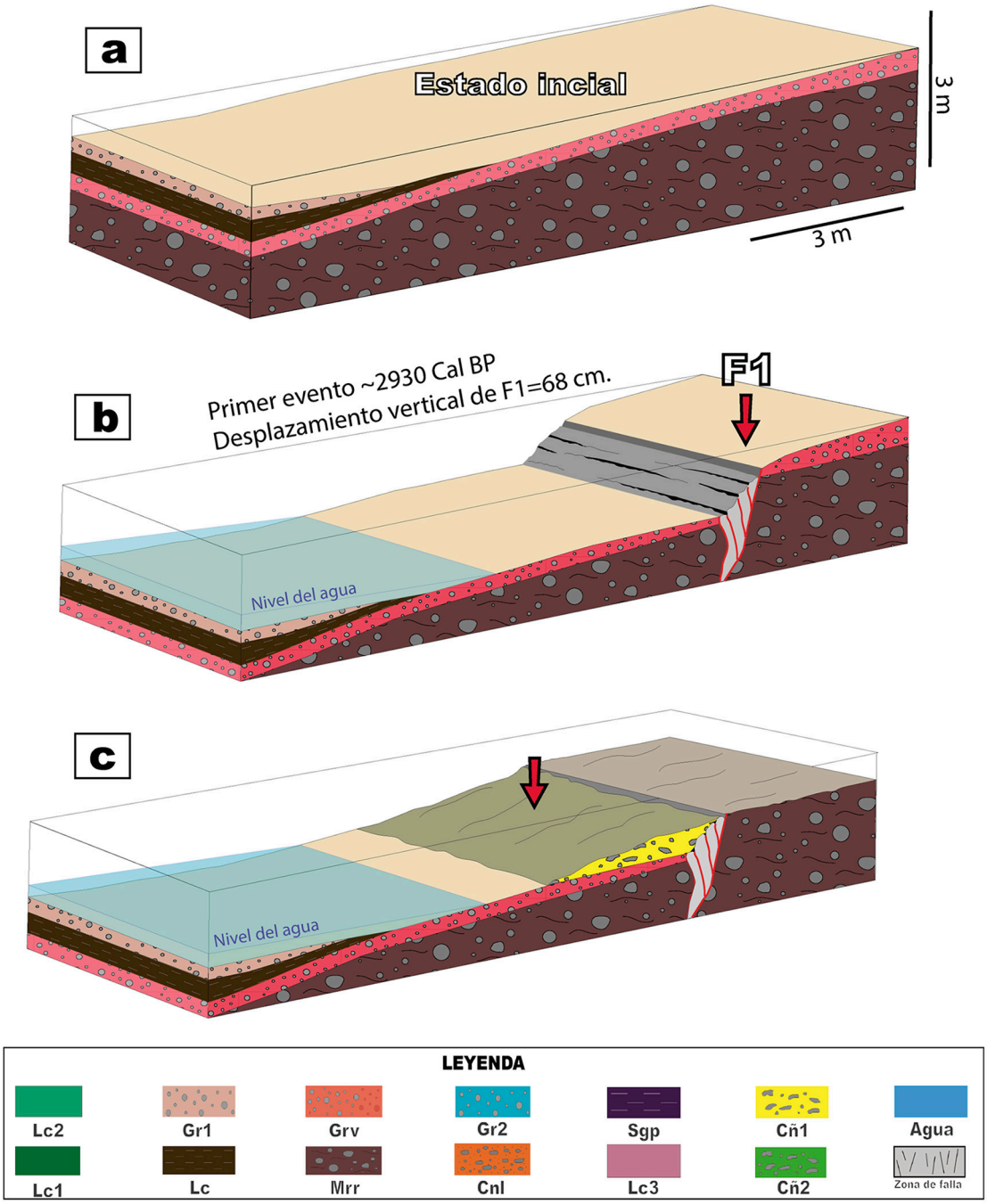


Figura 5.10 Reconstrucción esquemática de la trinchera Pachatusan (a) estado inicial de la trinchera cuyos niveles sedimentarios no presentan deformación; (b) evento que deforma los niveles Grv y Mrr produciendo un desplazamiento vertical de 68 cm que provoca la subida del nivel del agua; (c) depositación de la cuña coluvial Cñ1 al pie de la falla producto de la erosión del nivel Grv (elaboración propia).

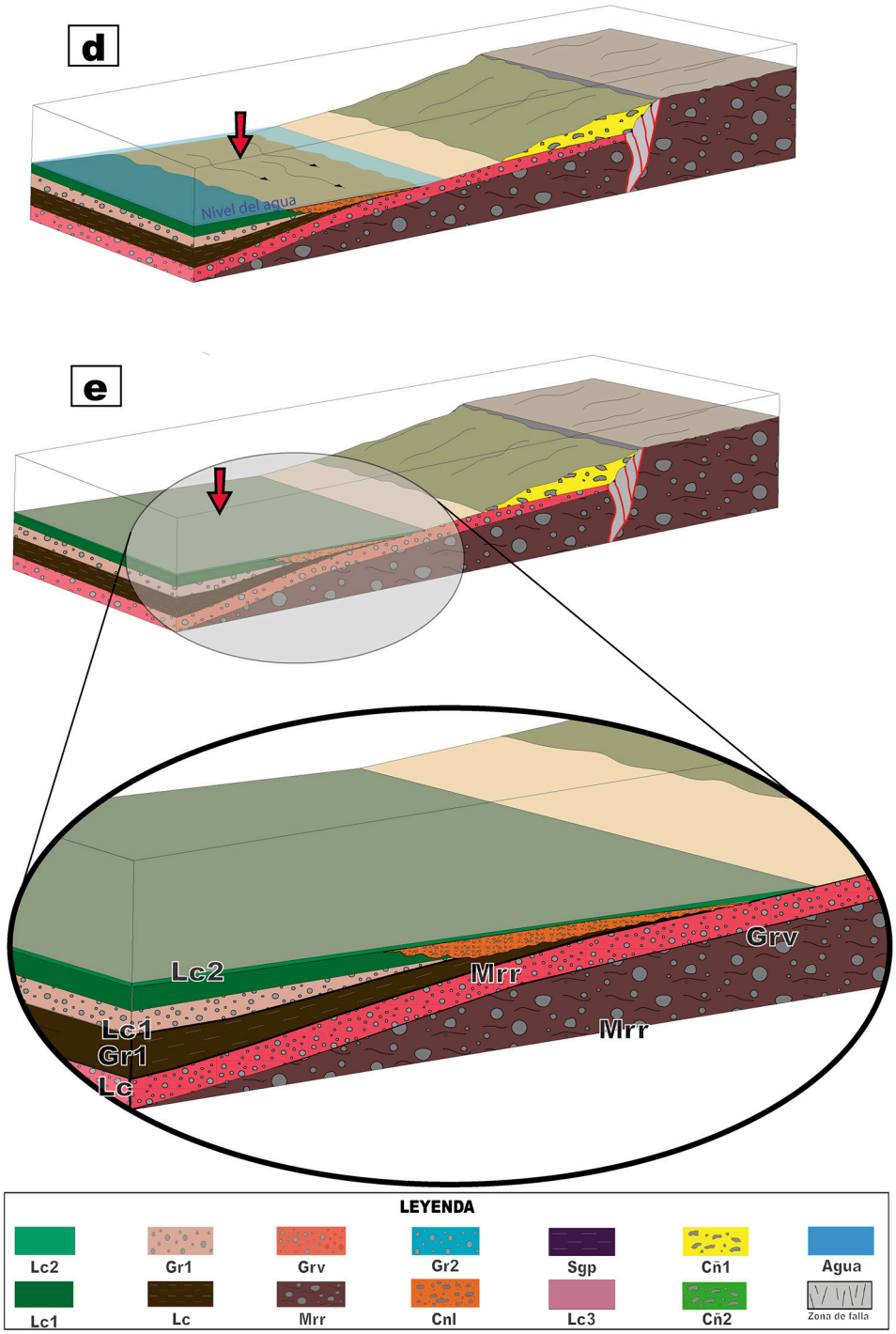


Figura 5.11 Reconstrucción esquemática de la trinchera Pachatusan (d) etapas de sedimentación lacustre Lc1 erosionada por una canal Cnl; (e) nivel lacustre Lc2 que cubriendo el canal de gravas (elaboración propia).

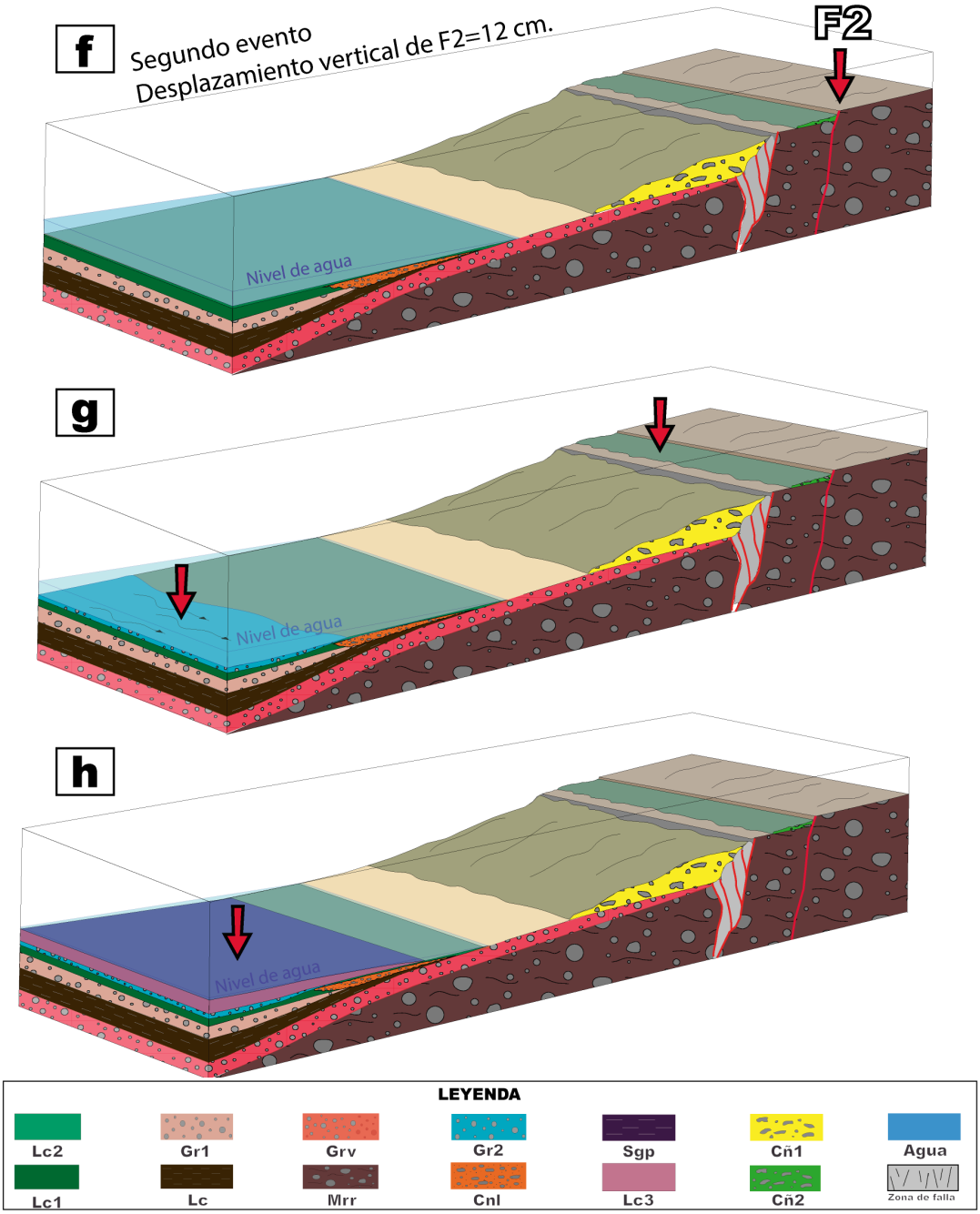


Figura 5.12 Reconstrucción esquemática de la trinchera Pachatusan (f) segundo evento que deforma parte del footwall en el nivel Mrr y deposita una pequeña cuña coluvial Cñ2 provocando el aumento del nivel del agua; (g) depositación de un canal de gravas Gr2 en respuesta a la basculación y colapso del *hangingwall*; (h) sedimentación de un nivel lacustre Lc3 con el nivel del agua aun alto (elaboración propia).

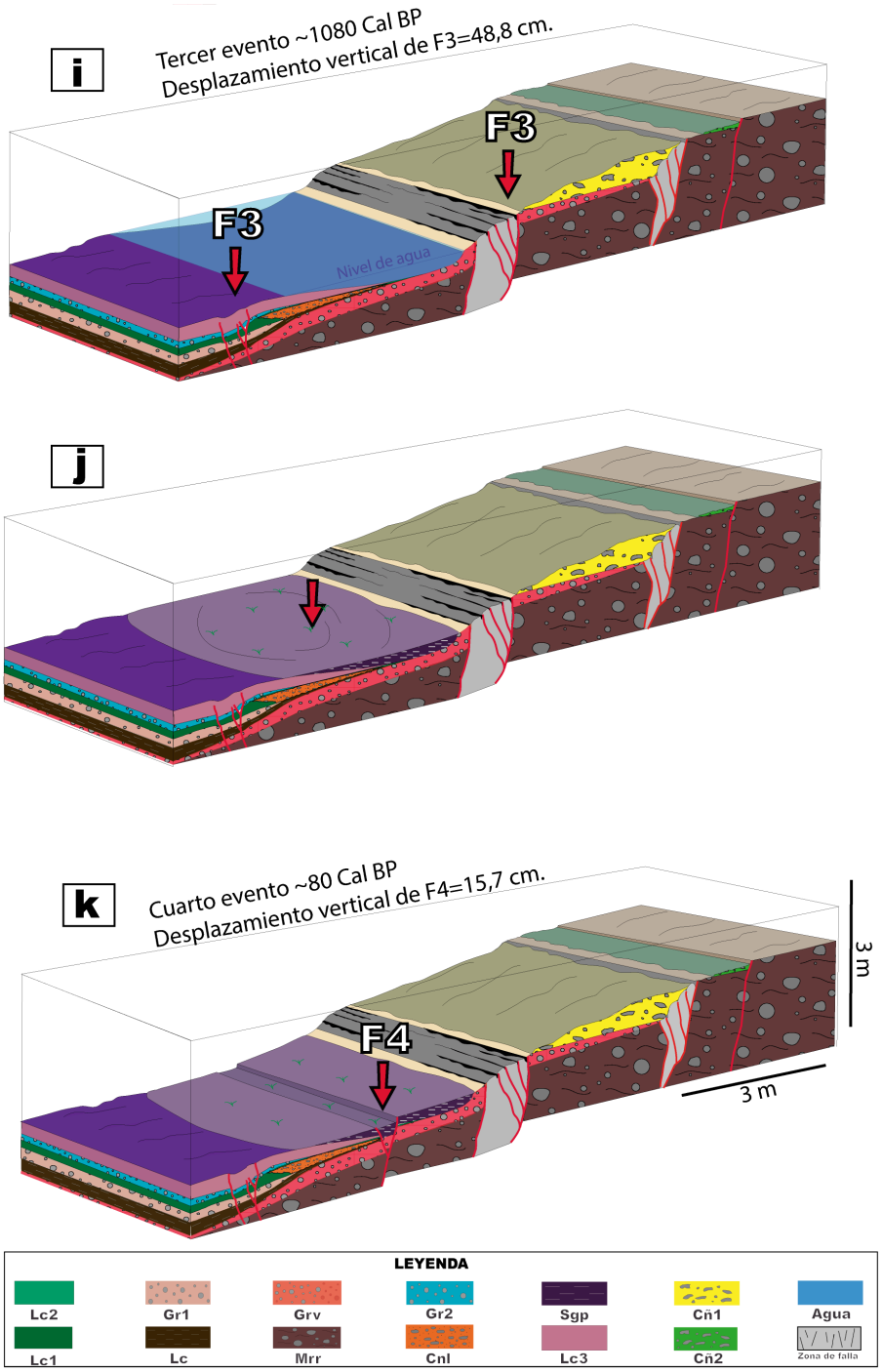


Figura 5.13 Reconstrucción esquemática de la trinchera Pachatusan (i) tercer evento que deforma los niveles del *hangingwall*; (j) formación de un relieve favorable para la sedimentación del *sagpond Sgp*; (k) última reactivación de falla que afecta el *sagpond Sgp* y los niveles Mrr, Grv (elaboración propia).

CAPÍTULO VI
CONCLUSIONES

- El análisis morfológico y cinemático del Sistema de Fallas Pachatusan nos permitió caracterizarlo como tipo normal con componente de rumbo. Se muestran trazos de falla principal al sureste que afectan morrenas de 14 000 años. a la altura del sector Muyucancha. Esta datación ha sido sugerida por Cabrera (1988) según las comparaciones que realiza con el nevado Quelcaya. También se muestran trazos de la falla principal al noroeste en el sector Amaro que afectan depósitos fluvioglaciares. Finalmente, en la parte central a la altura del sector Huacoto, se distribuye la deformación.
- El análisis morfométrico nos permitió cuantificar los desplazamientos. Para realizar esta tarea, usamos perfiles *Swath* medidos sobre modelos de elevación digital de *Drone* y *Pleiades*. Los trazos de falla principal superan los 20 metros con un máximo de 28,5 m de desplazamiento vertical, y más de 25 m de desplazamiento horizontal con un máximo de 33.2 m. En contraste, en la zona donde se distribuye la deformación, los desplazamientos son inferiores a los 10 metros. Este comportamiento se muestra tanto para los desplazamientos horizontales como para los verticales (figura 4.21 y 4.25). Se trata de un sistema de fallas con desplazamiento vertical normal y desplazamiento horizontal sinestral y un estilo de deformación por rotación de bloques (figura 4.26).
- El cartografiado morfoestructural nos permitió cuantificar 99 km de ruptura superficial, así como la magnitud máxima posible de 7.39 Mw, ante una reactivación del Sistema de Fallas Pachatusan.
- El análisis paleosismológico de una trinchera nos permitió calcular un intervalo de recurrencia de 1000 años; un evento F1 de magnitud 6,67 M que desplazó 68 cm hace Cal BP; un evento F2 de magnitud 6.18 M que desplazó 12 cm; un evento F3 de magnitud 6.57 M que desplazó 48.8 cm hace Cal BP. Además, logramos calcular, en el último evento F4, una magnitud de un sismo reciente de 6.25 Mw que desplazó 15.7 cm a un depósito lacustre con edad de ; por tal razón, se sugiere que la fuente sísmica que detonó en el terremoto de 1950 en el Cusco es el Sistema de Fallas Pachatusan.

BIBLIOGRAFÍA

Agisoft LLC (2017) - *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.3*. 105 p. https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_3_en.pdf

Aguirre, E. (2018) - *Caracterización morfo-estructural de una falla activa Purgatorio-Mirave en el ante-arco del sur del Perú*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 94 p.

Akyüz H.S., Karabacak V. & Zabcı C. (2014) - Paleoseismic Trenching. En: Beer M., Kougioumtzoglou I., Patelli E. & Au I.K., eds. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 15 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5_107-1

Angelier, J.; Bergerat, F.; Bellou, M.; & Homberg, C. (2004) - Co-seismic strike–slip fault displacement determined from push-up structures: the Selsund Fault case, South Iceland. *Journal of Structural Geology*, 26(4): 709-724. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.07.006

Angelier, J.; Lee, J.C.; Hu, J.C. & Chu, H.T. (2003) - Three-dimensional deformation along the rupture trace of the September 21st, 1999, Taiwan earthquake: a case study in the Kuangfu school. *Journal of Structural Geology*, 25(3): 351-370. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00039-1

Astrium (2012) - *Pléiades Imagery: user guide*. Toulouse: Astrium GEO-Information Services, 107 p.

Audebaud, E.; Capdevila, R.; Dalmayrac, B.; Debelmas, J.; Laubacher, G., et al. (1973) – Les traits géologiques essentiels des Andes Centrales (Pérou-Bolivie). *Revue de Géographie Physique et. de* Géologie Dynamique, (15)1-2: 73-114.

Barbarella, M.; Fiani, M. & Zollo, C. (2017) - Assessment of DEM derived from very high-resolution stereo satellite imagery for geomorphometric analysis. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1): 534-549. https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1372084

Benavente, C.; Delgado, F.; Taipe, E.; Audin, L & Pari, W. (2013) - Neotectónica y peligro sísmico en la región Cusco. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 55, 261 p. https://hdl.handle.net/20.500.12544/296

Burg, J.-P. (2015) - Strike-Slip and Oblique-Slip Tectonics. En: *Tectonics - Strike-slip faults*, p. 163-183.

Cabrera, A. & Petersen, G. (1936) - Reconocimiento geológico de los yacimientos petrolíferos del departamento de Puno. *Boletín Cuerpo de Ingenieros de Minas del Perú*, (115): 1-102.

Cabrera, J. (1988) - *Néotectonique et sismotectonique dans la Cordillère andine au niveau du changement de géometrie de la subduction: la région de Cusco (Pérou)*. Thése Docteur 3éme cycle, Université Paris-Sud, Centre d'Orsay, Paris, 275 p.

Cabrera, J. & Sébrier, M. (1998) - Surface rupture associated with a 5.3 mb earthquake: the 5 April 1986 Cuzco earthquake and kinematics of the Chincheros-Quoricocha faults of the High Andes, Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1): 242-255.

Candia, F. & Carlotto, V. (1985) - *Estudio geológico de la zona Huambutío-Lamay*. Tesis Ing. Geólogo, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, 86 p.

Carlotto, V. (1989) – Formación Huambutío: Nueva unidad estratigráfica, marcador del evento tectónico-sedimentario infraneocomiano. En: Workshop sobre el Cretáceo en el Perú, 1, Lima, 1989*, Resúmenes*. Lima: Grupo peruano PIGC 242, p. 5. Contribución PIGC 242 "Cretáceo de América Latina".

Carlotto, V.; Cárdenas, J. & Carlier, G. (2011) - Geología del cuadrángulo de Cusco, hoja 28-s, escala 1:50,000. *INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional*, 138, 261 p. https://hdl.handle.net/20.500.12544/99

Carlotto, V.; Cárdenas, J.; Chávez, R.; Gil, W.; Jaillard, E. & Carlier, G. (1991) - Estratigrafía de la Formación Huambutío (Kimmeridgiano-Berriasiano) Cusco-Perú.

En: Congreso Peruano de Geología, 7, Lima 1991. *Resúmenes extendidos.* Lima: Sociedad Geológica del Perú, t. 2, p. 591-597.

Carlotto, V.; Gil, W.; Cárdenas, J. & Chávez, R. (1996) - Geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca. Hojas: 27-r y 27-s. *INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional*, 65, 245 p. https://hdl.handle.net/20.500.12544/187

Carlotto, V.; Jaillard, E. & Mascle, G. (1992) – Relación entre sedimentación, paleogeografía y tectónica en la región de Cusco (sur del Perú) entre el Jurásico superior - Paleoceno. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (83): 1-20.

Córdova, E. (1986) – *Un bassin intramontagneux andin peruvien. Les couches rouges du bassin de Cuzco (Maestrichtien-Palèocene)*. Docteur du 3ème cycle, Université de Pau et des Pays de L'Adour, Laboratoire de Geodynamique des Bassins Sedimentaires, Pau, 272 p.

Córdova, E.; Escobedo, R. & Gárate, V. (1994) - Evolución tectónica-sedimentaria de la cuenca cuaternaria del Cusco: Formación San Sebastián. En: Congreso Peruano de Geología, 8, Lima, 1994. *Resúmenes extendidos*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 225-227.

Cunningham, W.D. & Mann, P. (2007) - Tectonics of strike-slip restraining and releasing bends. *Geological Society, London, Special Publications*, 290(1), 1-12. https://doi.org/10.1144/SP290.1

England, P., & Molnar, P. (1990) - Right-lateral shear and rotation as the explanation for strike-slip faulting in eastern Tibet. *Nature*, 344(6262): 140-142. https://doi.org/10.1038/344140a0

Ericksen, G.E.; Fernández Concha, J. & Silgado, E. (1954) - The Cuzco, Peru, earthquake of May 21, 1950. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 44(2A): 97-112.

Fallas, J. (2007) - *Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones*. 83 p.

Gabelman, J.W. & Jordan, V. (1964) – *Geology of the Cuzco-Anta-Urubamba area, Cuzco Department, Peru*. Washington, D.C.: Atomic Energy Commission, Division Technical Information, 95 p., RME 4584.

Gabrielsen, R.H.; Braathen, A.; Dehls, J. & Roberts, D. (2002) - Tectonic lineaments of Norway. *Norwegian Journal of Geology,* 82: 153-174. https://www.geologi.no/images/NJG_articles/NGT_82_3_153-174.pdf

Gregory, H.E. (1916) – A geological reconnaissance of the Cuzco valley, Peru. *American Journal of Sciences*, 41(241): 1-100. https://doi.org/10.2475/ajs.s4-41.241.1

Hempton, M.R., & Dunne, L.A. (1984) - Sedimentation in pull-apart basins: active examples in eastern Turkey. *The Journal of Geology*, 92(5), 513-530. https://doi.org/10.1086/628889

Jordan, G., & Schott, B. (2005) - Application of wavelet analysis to the study of spatial pattern of morphotectonic lineaments in digital terrain models. A case study. *Remote Sensing of Environment*, 94(1): 31-38. https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.013

Laubacher, G. (1978) - Estudio geológico de la región norte del Lago Titicaca. *Instituto de Geología y Minería, Boletín, Serie D: Estudios Especiales*, 5, 139 p. https://hdl.handle.net/20.500.12544/320

Lettis, W.; Bachhuber, J.; Witter, R.; Brankman, C.; Randolph, C.E.; Barka, A.; Page, W.D. & Kaya, A. (2002) - Influence of releasing step-overs on surface fault rupture and fault segmentation: Examples from the 17 August 1999 Izmit earthquake on the North Anatolian fault, Turkey. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1): 19-42. https://doi.org/10.1785/0120000808

Masoud, A.A., & Koike, K. (2011) - Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data. *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(6), 818-832. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.08.003

McCalpin, J.P. (1996) - Paleoseismology in extensional tectonic environments. En: McCalpin, J.P., ed. *Paleoseismology*. San Diego, CA: Academic Press, International Geophysics, vol. 62, p. 85-146. https://doi.org/10.1016/S0074-6142(09)95003-3

Meghraoui, M. & Atakan, K. (2014) - The Contribution of Paleoseismology to Earthquake Hazard Evaluations. En: Wyss, M., ed. *Earthquake Hazard, Risk and Disaster*s. Amsterdam: Elsevier, p. 237–271. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394848-9.00010-9

Mendívil, S. & Dávila, D. (1994) - Geología de los cuadrángulos de Cuzco y Livitaca. Hojas: 28-s y 29-s. *INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional*, 52, 115 p. https://hdl.handle.net/20.500.12544/173

Muhammad, M.M., & Awdal, A.H. (2012) - Automatic mapping of lineaments using shaded relief images derived from digital elevation model (DEM) in Erbil-Kurdistan, northeast Iraq. *Advances in Natural and Applied Sciences*, 6(2): 138-147. http://www.aensiweb.com/old/anas/2012/138-146.pdf

Murillo-García, F.G.; Alcántara-Ayala, I.; Ardizzone, F.; Cardinali, M.; Fiourucci, F. & Guzzetti, F. (2015) - Satellite stereoscopic pair images of very high resolution: a step forward for the development of landslide inventories. *Landslides*, 12(2), 277-291. https://doi.org/10.1007/s10346-014-0473-1

Newell, N.D.; Chronic, J. & Roberts, T.G. (1953) - *Upper Paleozoic of Peru*. New York: Geological Society of America, 276 p. GSA Memoirs, 58. https://doi.org/10.1130/MEM58

Olaya, V. (2014) - *Sistemas de información geográfica*. [s.l.]: Víctor Olaya, 832 p.

Panizza, M.; Castaldini, D.; Bollettinari, G.; Carton, A. & Mantovani, F. (1987) - Neotectonic research in applied geomorphological studies. *Zeitschrifr für Geomorphologie N.F.*, 63: 173-211. http://www.neotectonica.ufpr.br/neotectonica/estudos.pdf

Ramli, M.F.; Yusof, N.; Yusoff, M.K.; Juahir, H. & Shafri, H.Z.M. (2010) - Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: a review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69(2): 215-233. https://doi.org/10.1007/s10064-009-0255-5

Rao, G.; Lin, A. & Yan, B. (2015) - Paleoseismic study on active normal faults in the southeastern Weihe Graben, central China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114(1): 212-225. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.04.031

Schnellmann, M.; Anselmetti, F.S.; Giardini, D. & Mckenzie, J.A. (2006) - 15,000 Years of mass-movement history in Lake Lucerne: Implications for seismic and tsunami hazards. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 99(3): 409-428. https://doi.org/10.1007/s00015-006-1196-7

Sébrier, M.; Mercier, J.L.; Mégard, F.; Laubacher, G. & Carey-Gailhardis, E. (1985) - Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the Central Andes of South Perú. *Tectonics*, 4(7): 739-780. https://doi.org/10.1029/TC004i007p00739

Shake, S.N. & McHone, J.G. (1987) - Topographic lineaments and their geologic significance in central New England and adjacent New York. *Northeastern Geology*, 9(3): 120-128.

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 Ingeniería Geológica*, 3, 130 p. https://hdl.handle.net/20.500.12544/251

Tchalenko, J.S. (1970) - Similarities between shear zones of different magnitudes. *Geological Society of America Bulletin*, 81(6), 1625-1640. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[1625:SBSZOD]2.0.CO;2

Telbisz, T.; Kovács, G.; Székely, B. & Szabó, J. (2013) - Topographic swath profile analysis: a generalization and sensitivity evaluation of a digital terrain analysis tool. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 57(4): 485-513. https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/0110

Von Hagke, C., Kettermann, M., Bitsch, N., Bücken, D., Weismüller, C., & Urai, J. L. (2019) - The effect of obliquity of slip in normal faults on distribution of open fractures. *Frontiers in Earth Science*, 7, 18. https://doi.org/10.3389/feart.2019.00018

Wakabayashi, J. (2007) - Stepovers that migrate with respect to affected deposits: field characteristics and speculation on some details of their evolution. *Geological Society, London, Special Publications*, 290(1): 169-188. https://doi.org/10.1144/SP290.4

Wells, D.L. & Coppersmith, K.J. (1994) - New empirical relationships among magnitude, rupture length, ruptura width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974-1002.

Woodcock, N.H. & Fischer, M. (1986) - Strike-slip duplexes. *Journal of Structural Geology*, 8(7): 725-735. https://doi.org/10.1016/0191-8141(86)90021-0

ANEXOS

Anexo I. Glosario

Anexo II. Perfiles Swath

Anexo III. Tablas de desplazamiento verticales y horizontal

Anexo I. Glosario

GLOSARIO

- **Escarpe:** Superficie del salto o pendiente generada por la reactivación una falla
- ***Hangingwall***: Bloque móvil generado por la reactivación de una falla
- ***Footwall***: Bloque fijo generado por la reactivación de una falla
- ***Sagponds***: Depresiones generadas por deformaciones de falla favorables para la acumulación de sedimentos lacustres
- **Bends**: Curvaturas visibles en planta de una falla geológica
- **Sinestral**: Componente lateral izquierda de una falla geológica
- **Dextral**: componente lateral derecha de una falla geológica
- Transcurrente: estilo de deformación de una falla geológica con componente de desplazamiento horizontal
- **Cuña coluvial**: Acumulación de sedimentos al pie de un escarpe producido por una falla geológica
- **Lacustre**: Depósito sedimentario con alto contenido orgánico generado en ambientes bastante húmedos como lagunas
- **Duplexación**: Estilo de deformación de una falla cuyo componente horizontal es importante formaron estructuras sigmoidales visibles en planta
- **Transtensivo**: Estilo de deformación de una falla geológica donde existe una componente transtensiva y extensiva

Anexo II. Perfiles Swath

PERFILES *SWATH*

Los Perfiles Swath son considerados una versión mejorada de un perfil topográfico. Se realiza con la intención de evitar la arbitrariedad de un perfil de lineal simple. Lo cual ayuda en la cuantificación de desplazamiento sobre superficies heterogéneas.

Este método utiliza los valores Z (altura) del terreno extraídos de un área, los cuales se plotean en un plano cartesiano de dos dimensiones, Z vs Distancia. Se realiza el análisis estadístico de datos para identificar los datos mínimos, medios y máximos, se utiliza la información media como la representativa de la superficie. Posteriormente se aplica un algoritmo en Pyhton, para identificar el desplazamiento producido entre dos superficies (Hangingwall y Footwall), producidos por la reactivación de una falla.

A continuación, se presentan los perfiles generados en las diferentes áreas de la zona de estudio.

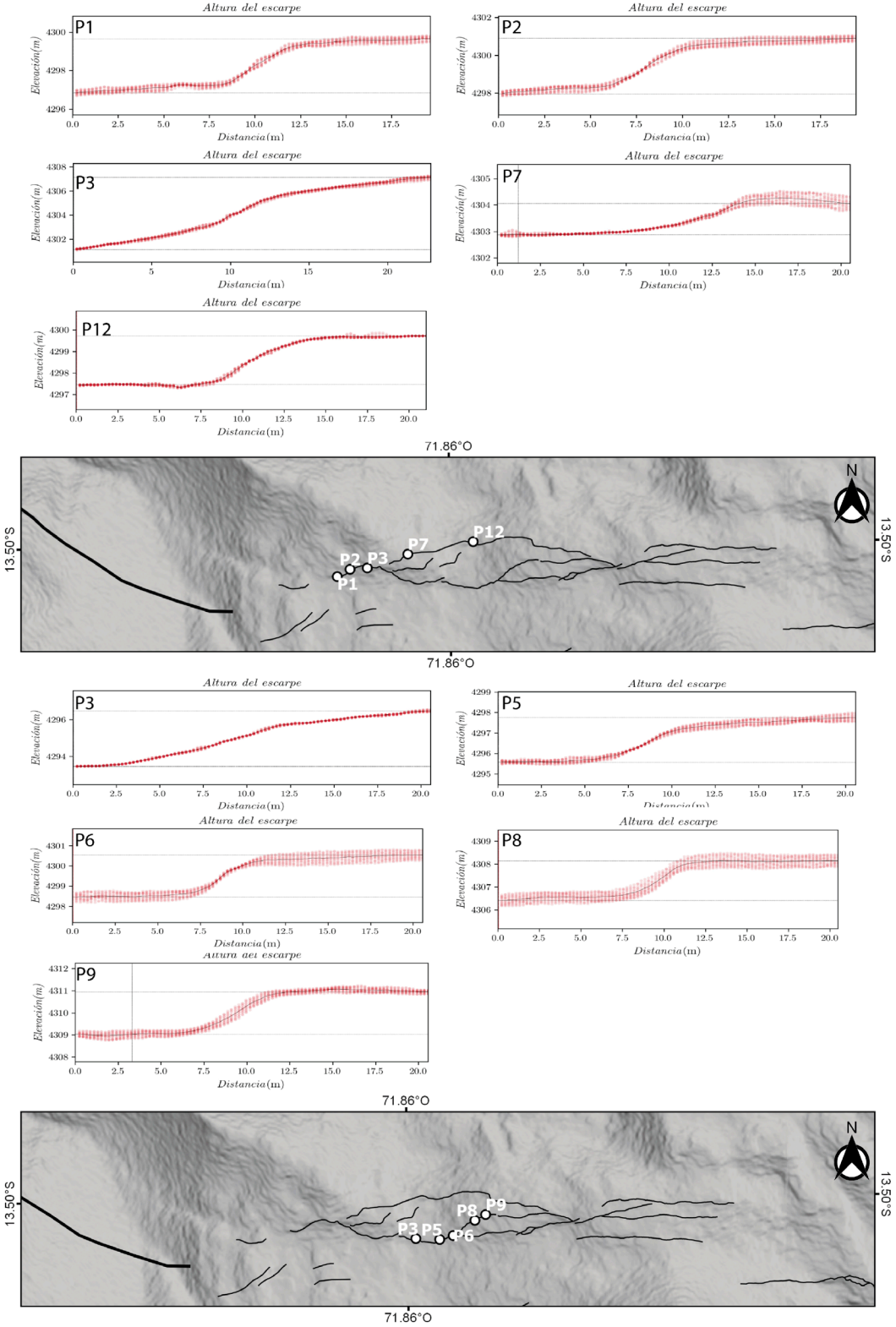


Figura B.1 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (01/22)

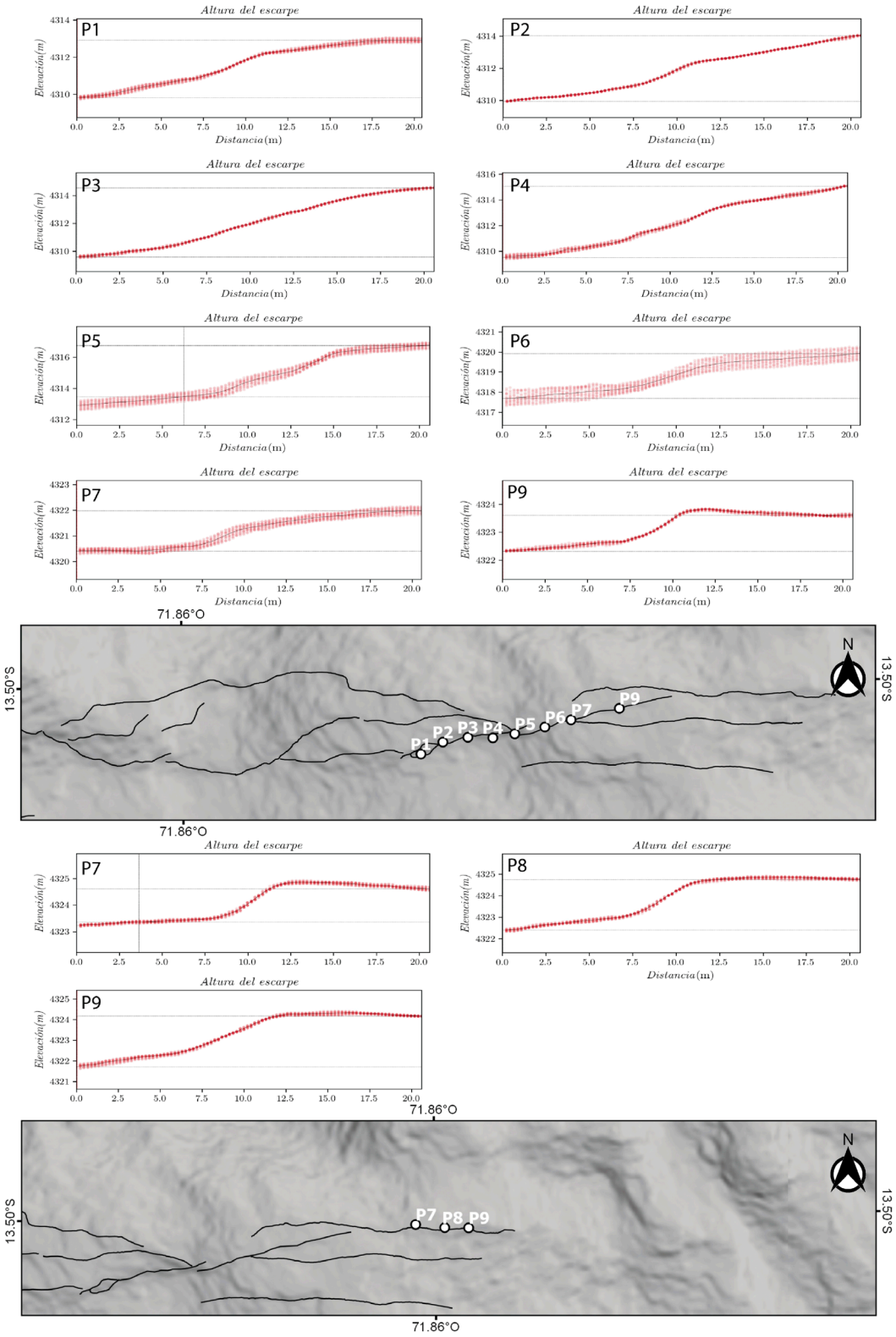


Figura B.2 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (02/22)

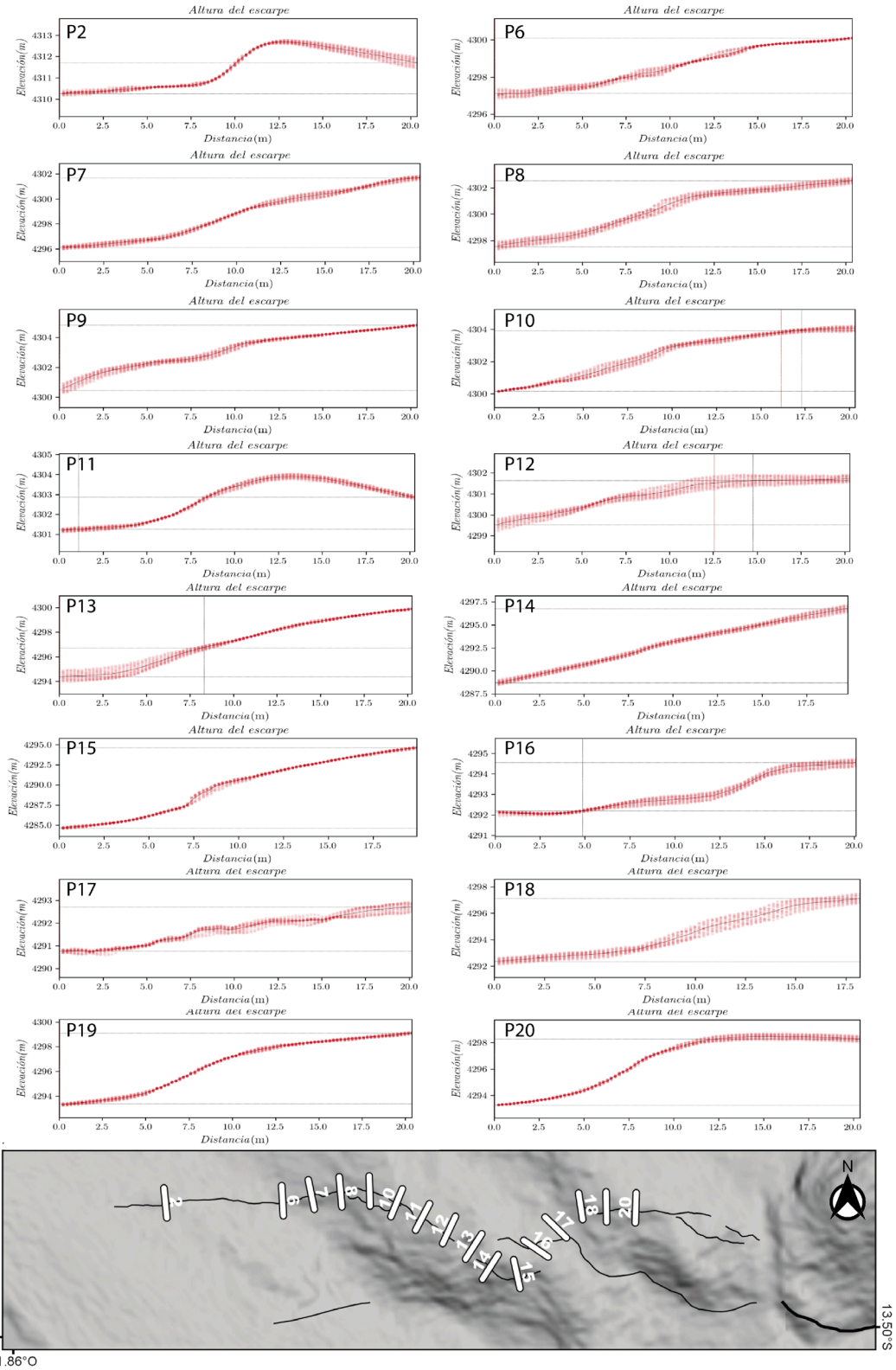
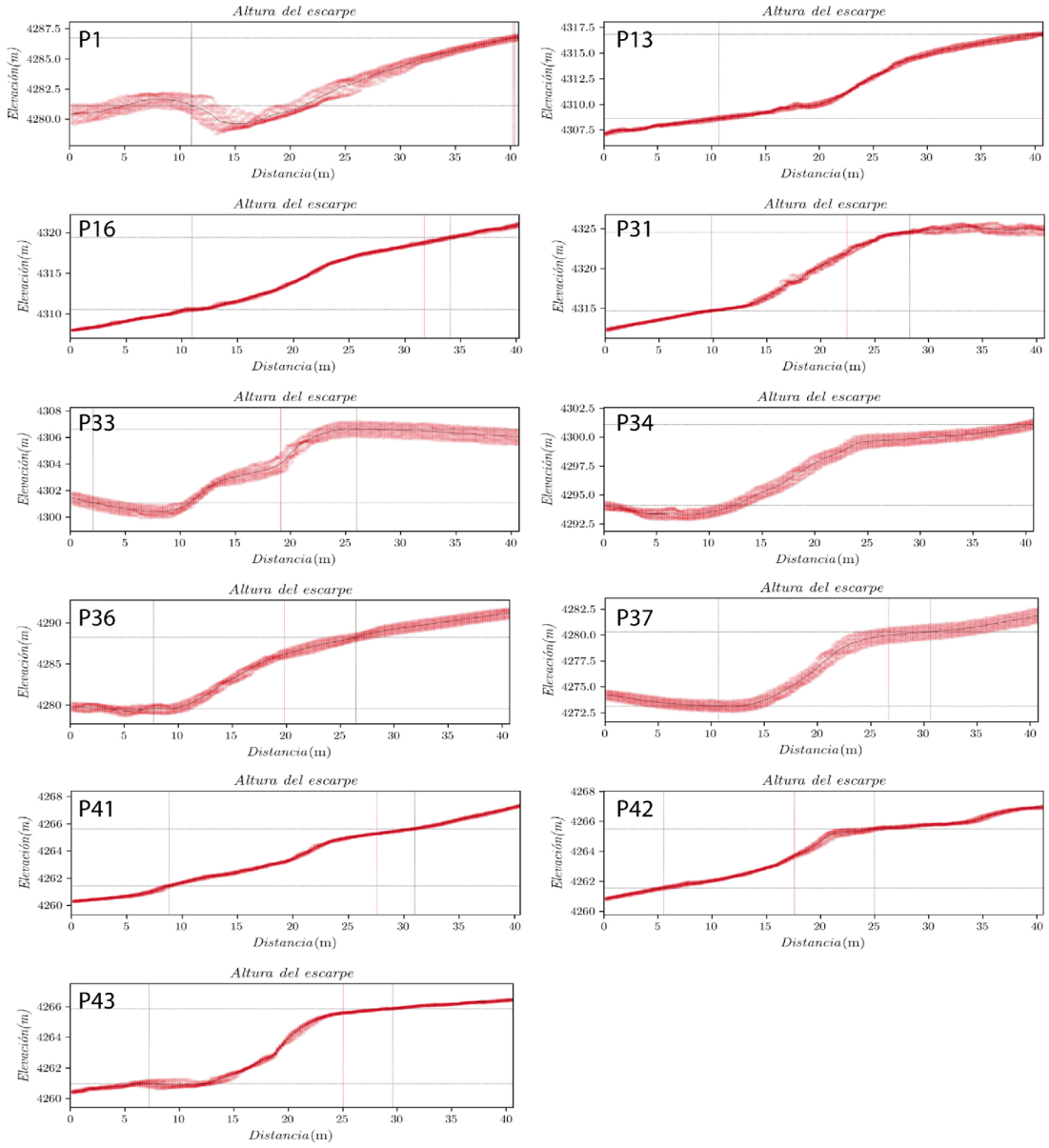


Figura B.3 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (03/22)



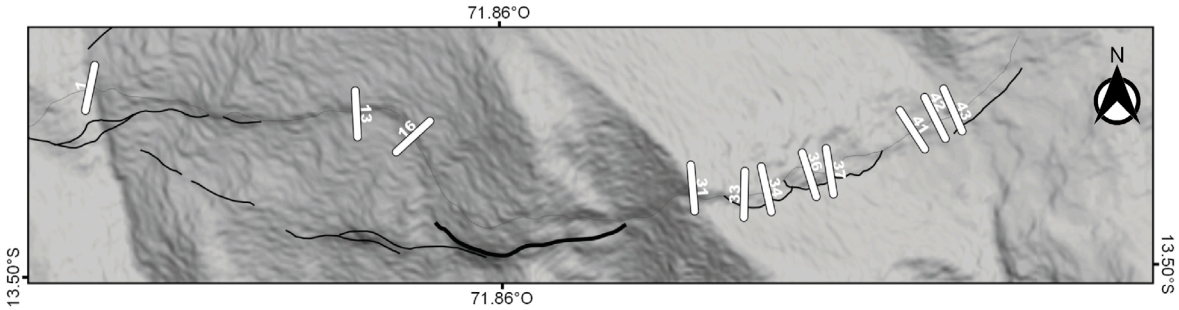


Figura B.4 *Swath Profile* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (04/22)

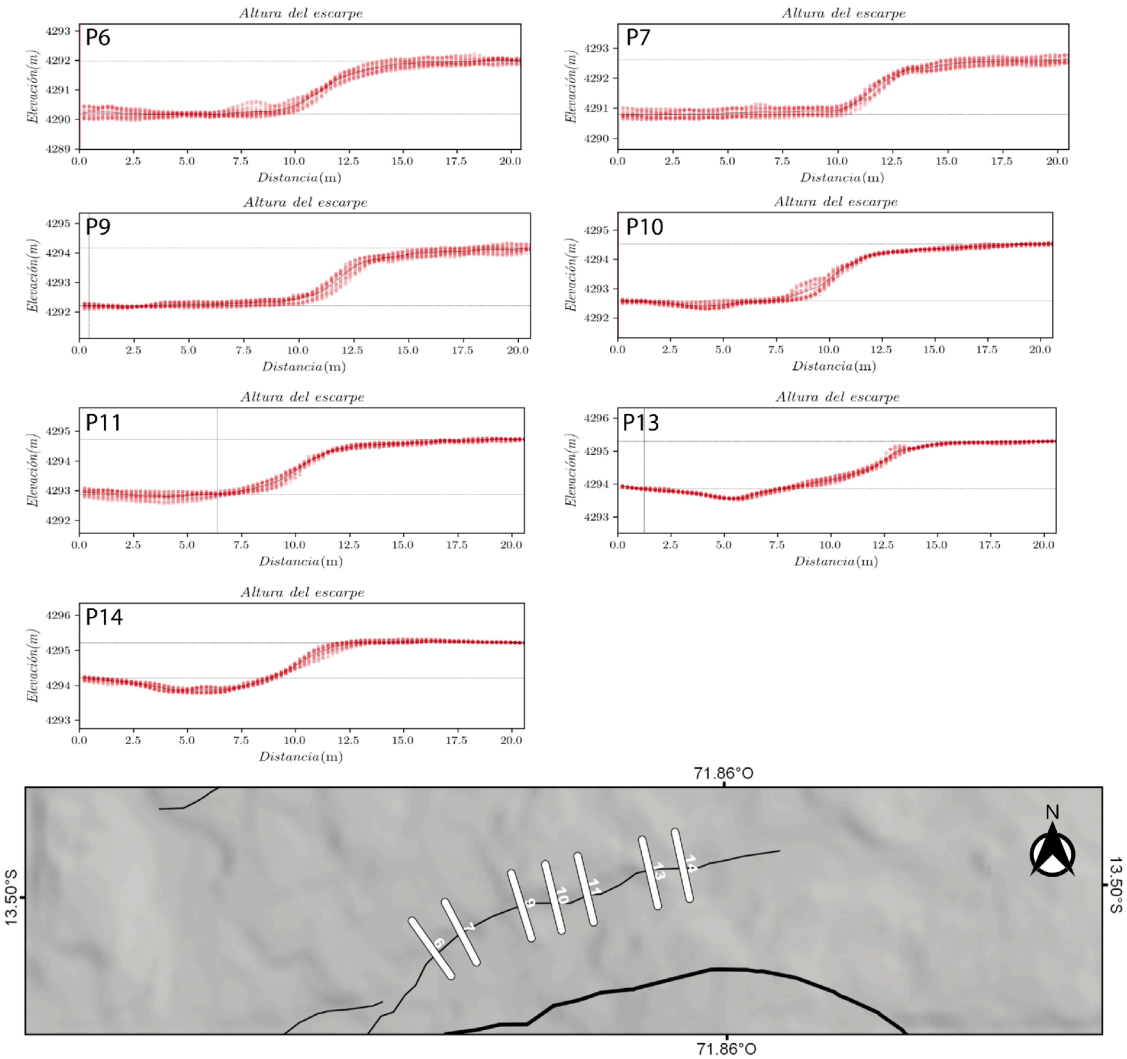


Figura B.5 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (05/22)

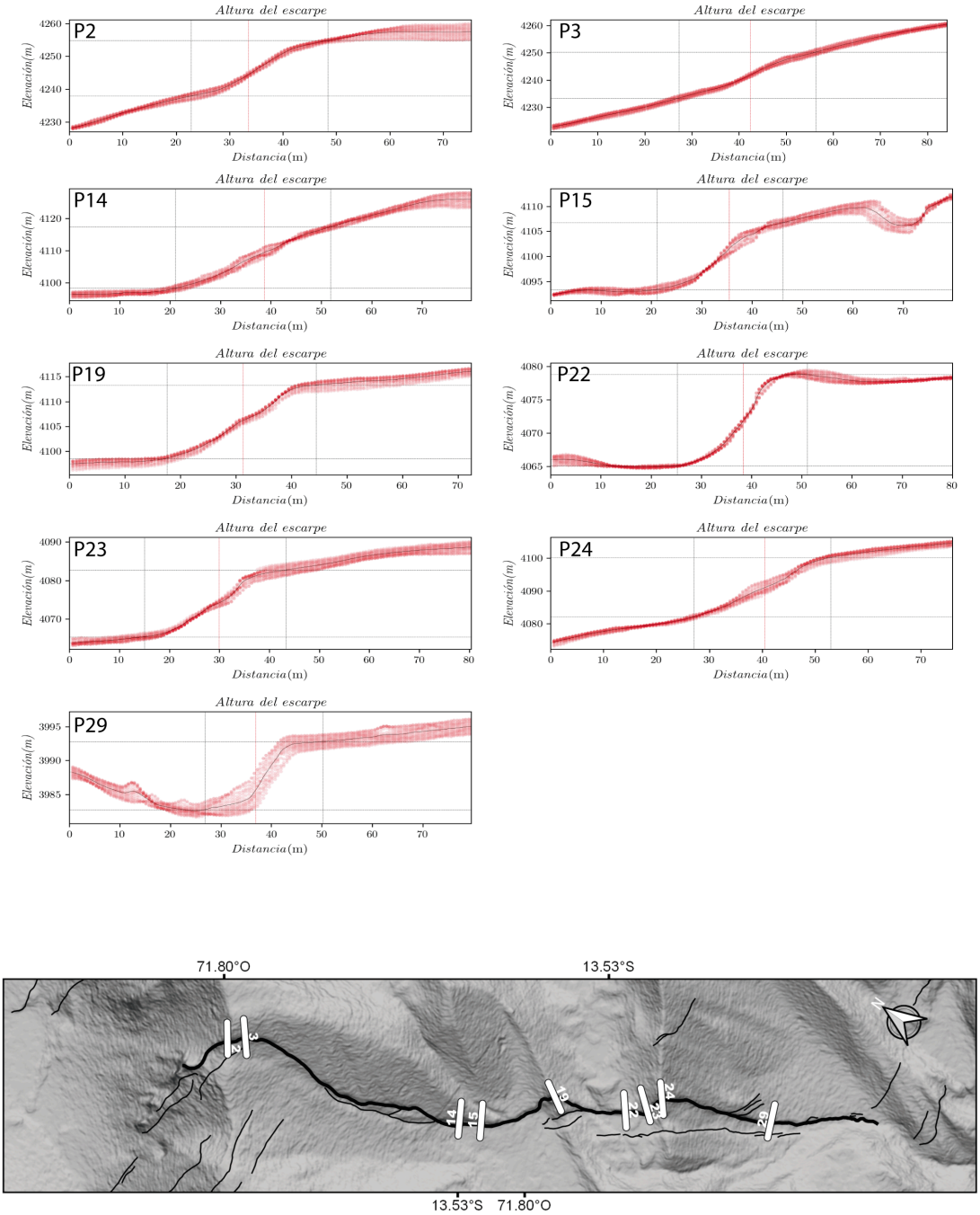


Figura B.6 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (06/22)

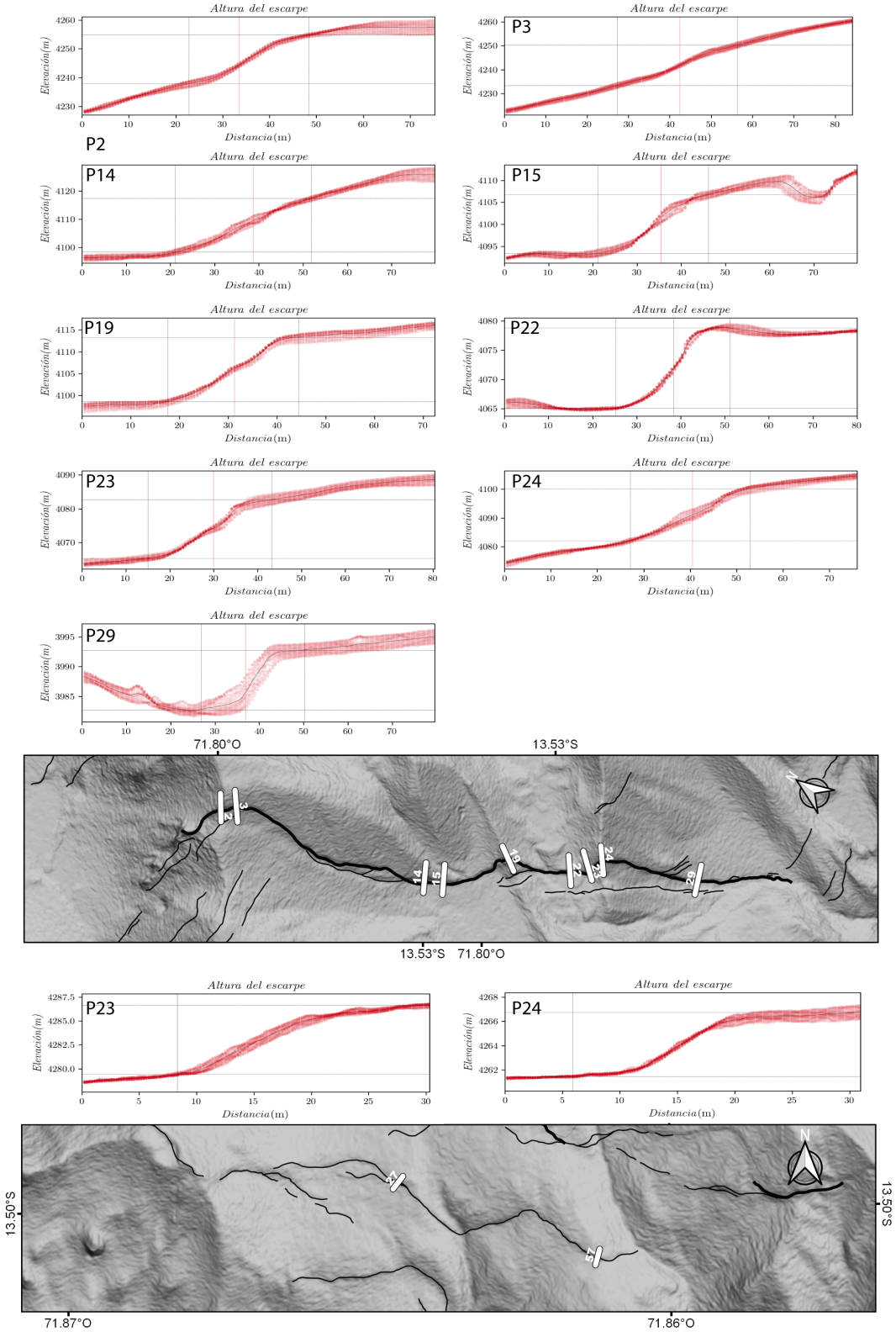


Figura B.7 **Swath Profiles** realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (07/22)

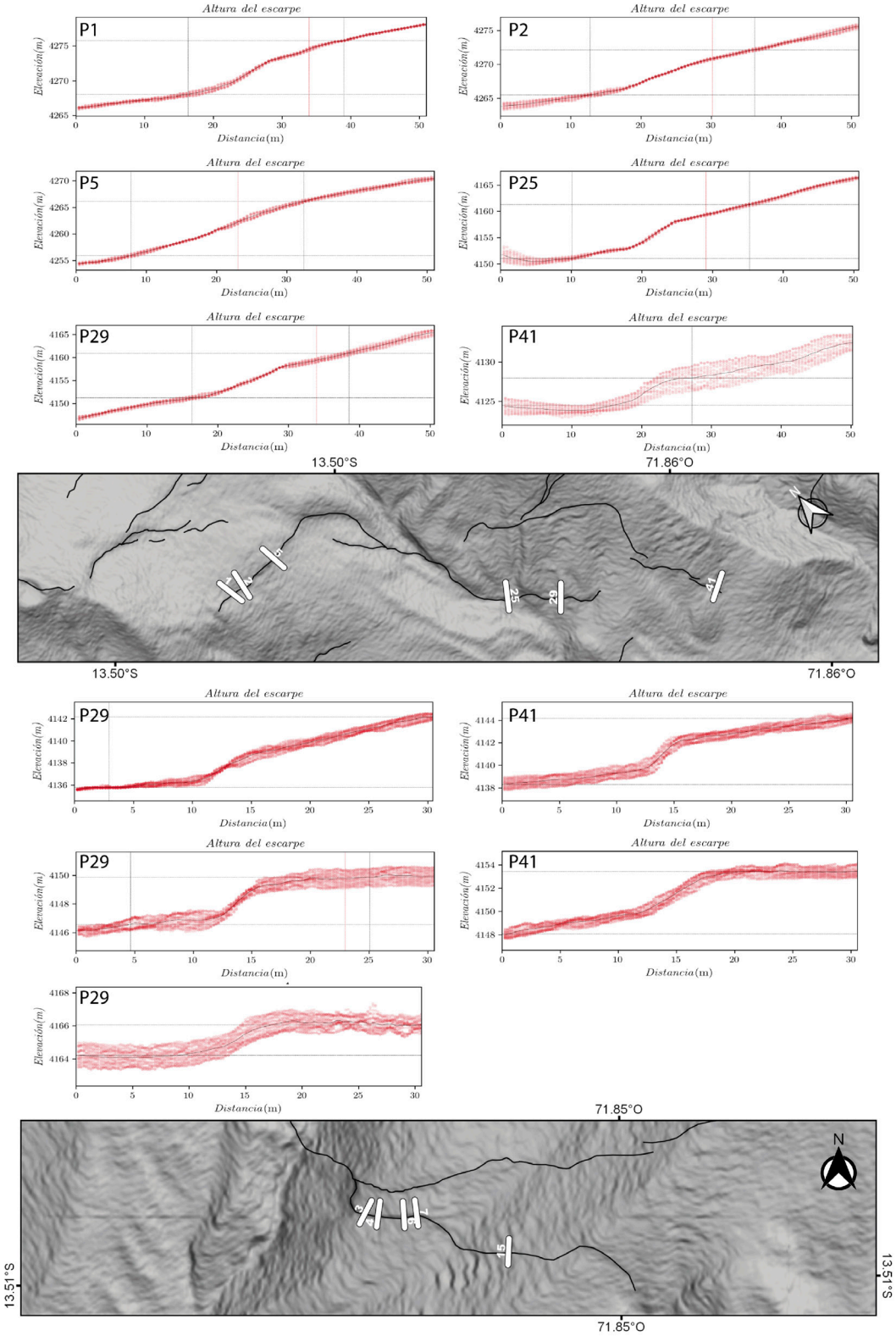


Figura B.8 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (08/22)

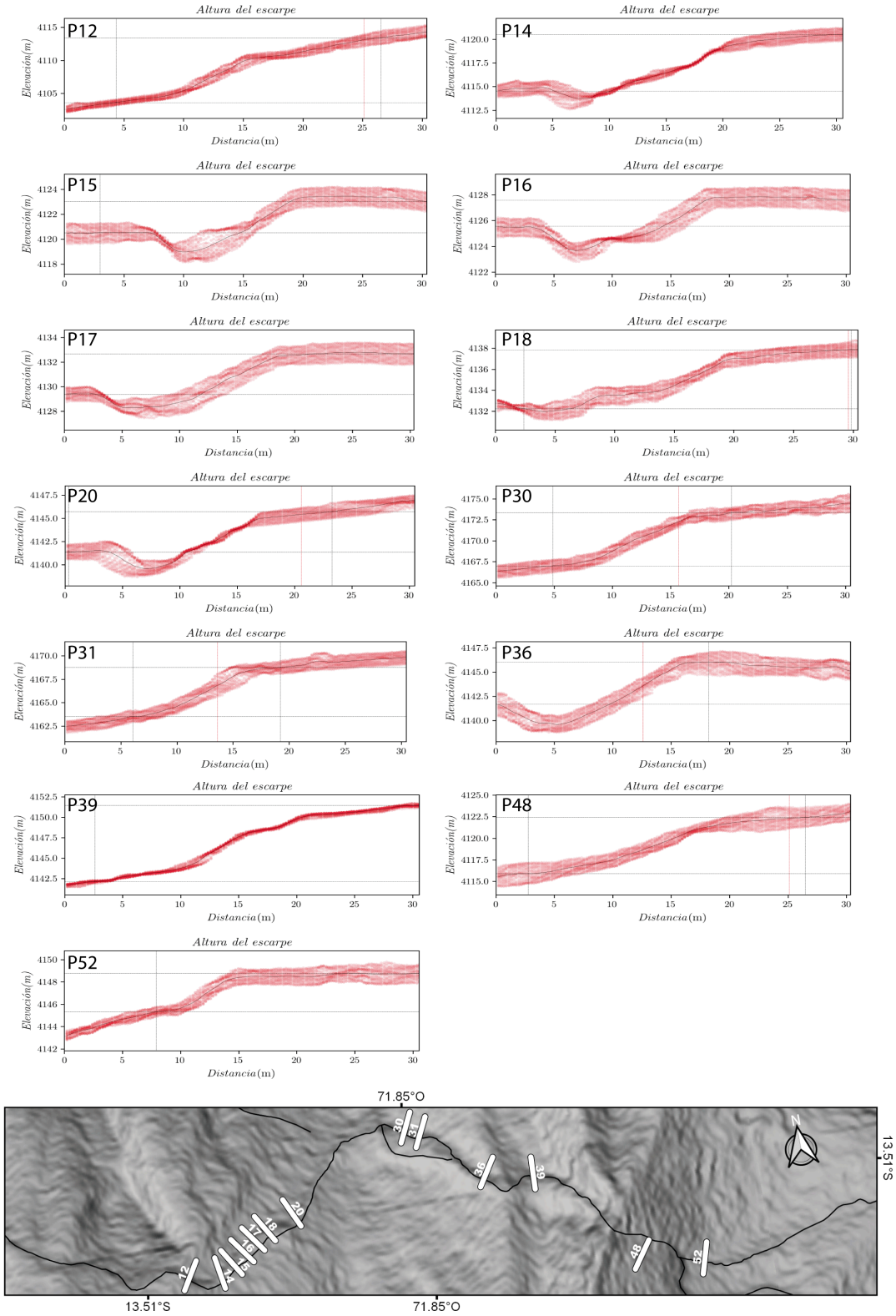


Figura B.9 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (09/22)

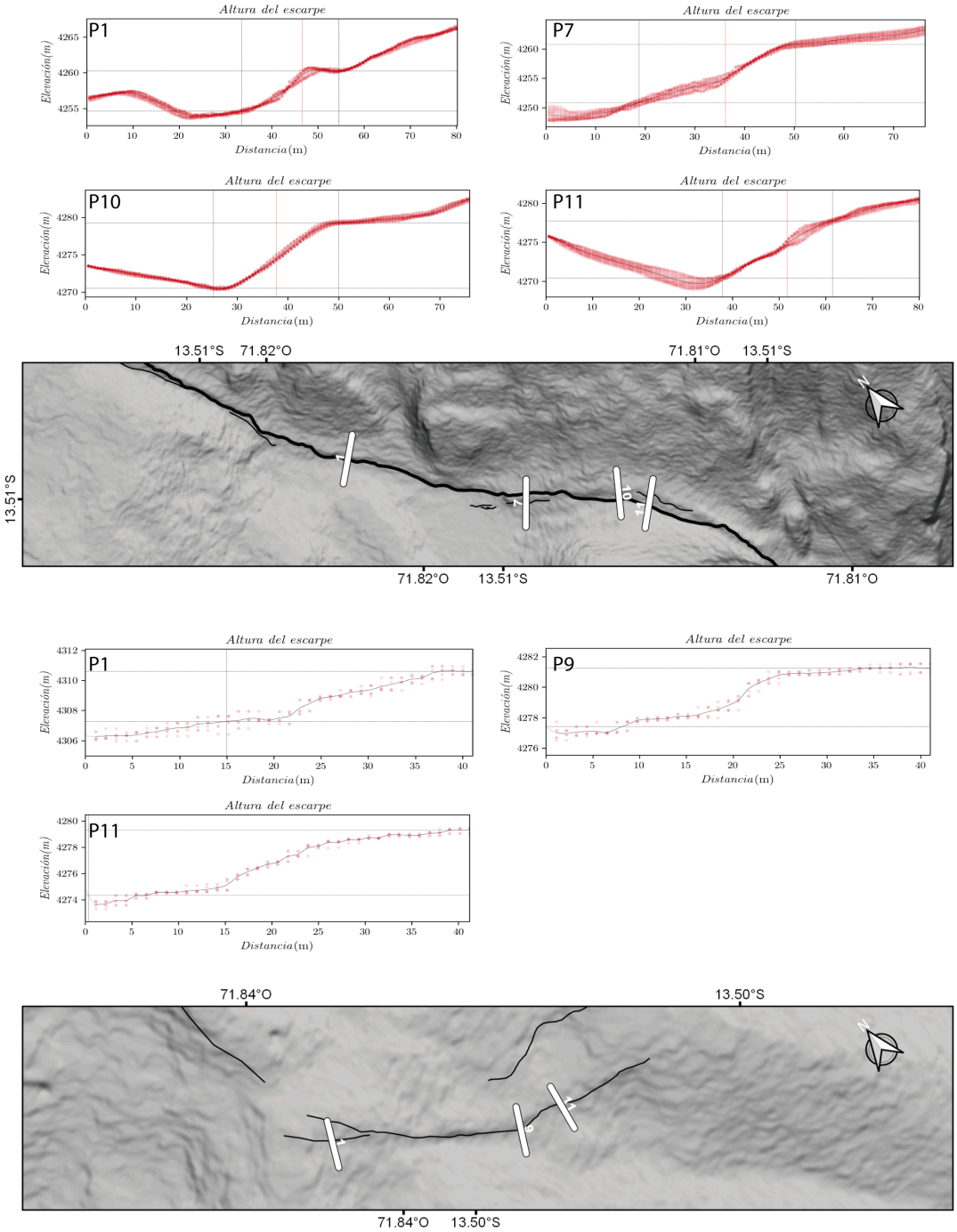


Figura B.10 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (10/22)

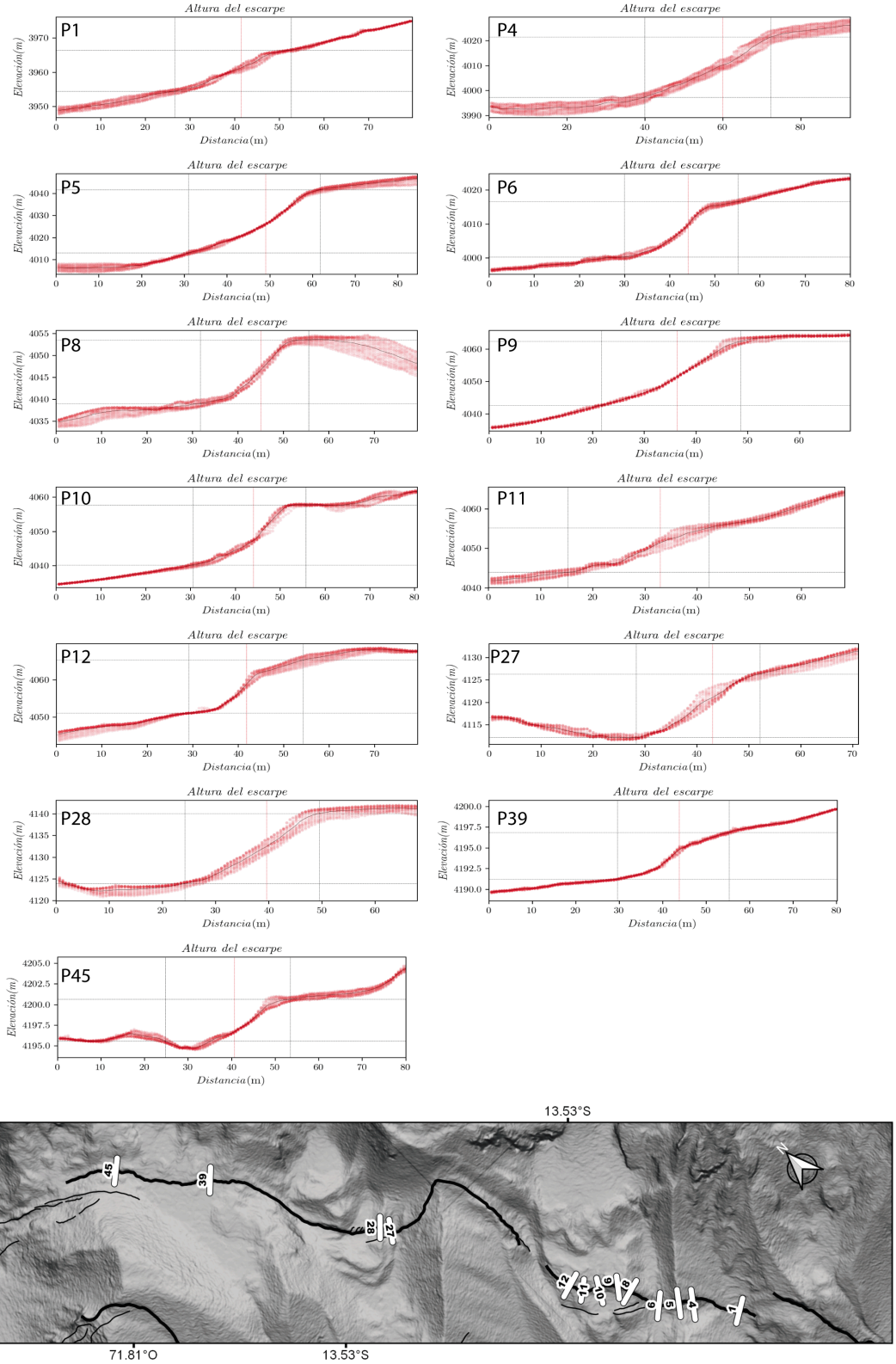
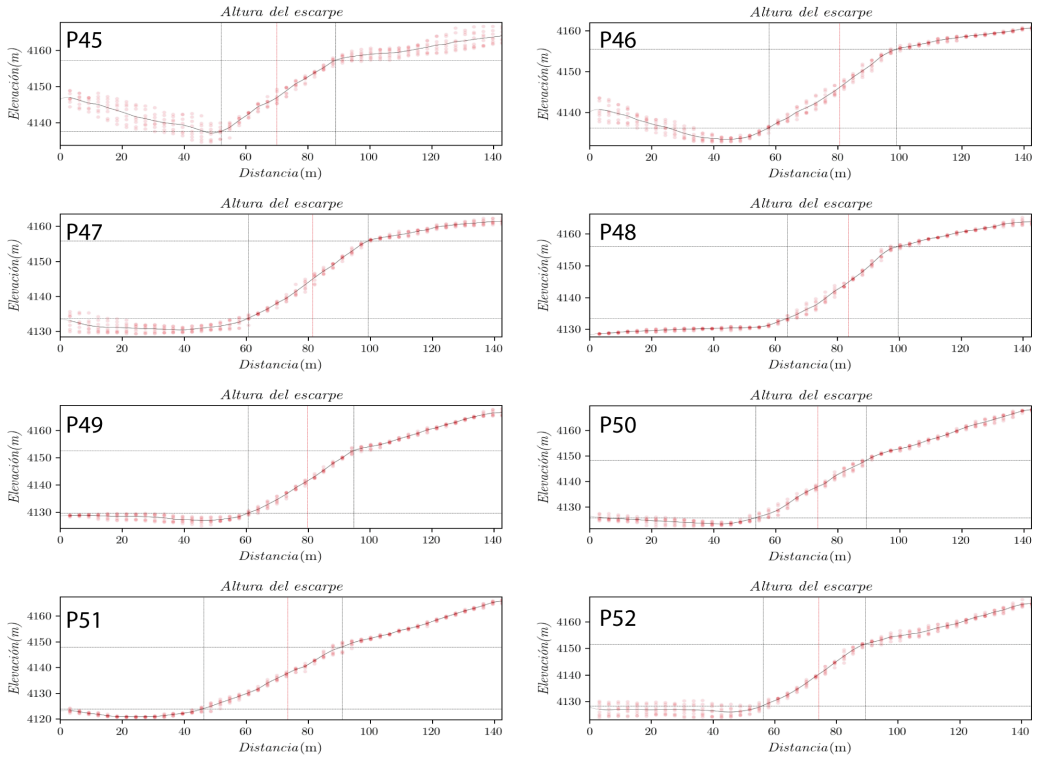


Figura B.11 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (11/22)



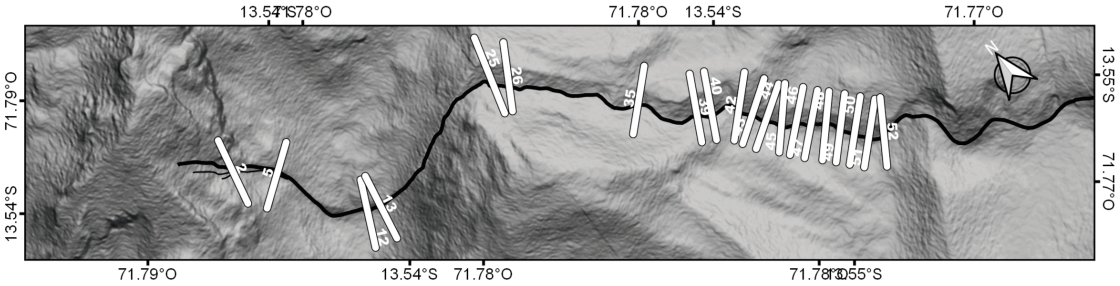
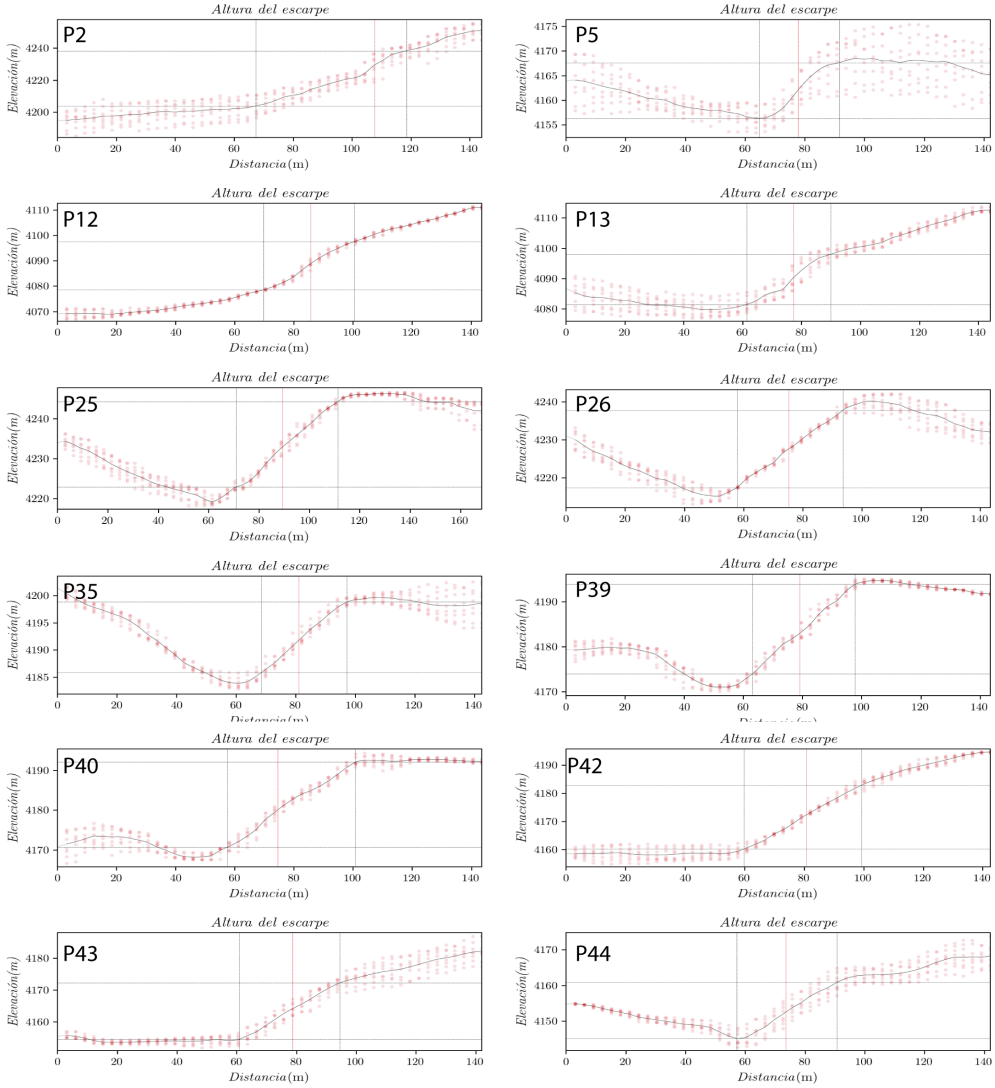


Figura B.12 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (12/22)



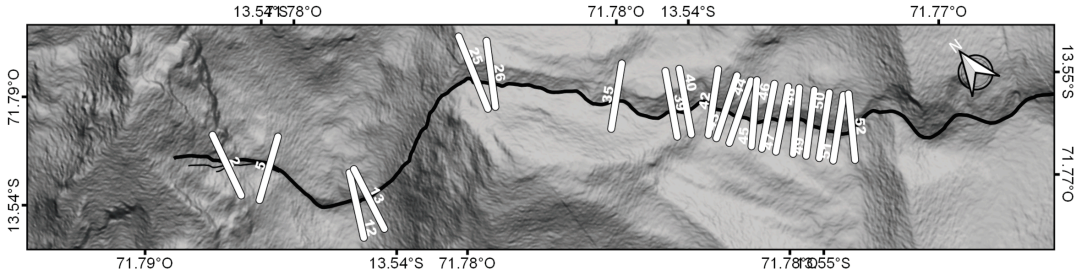


Figura B.13 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (13/22)

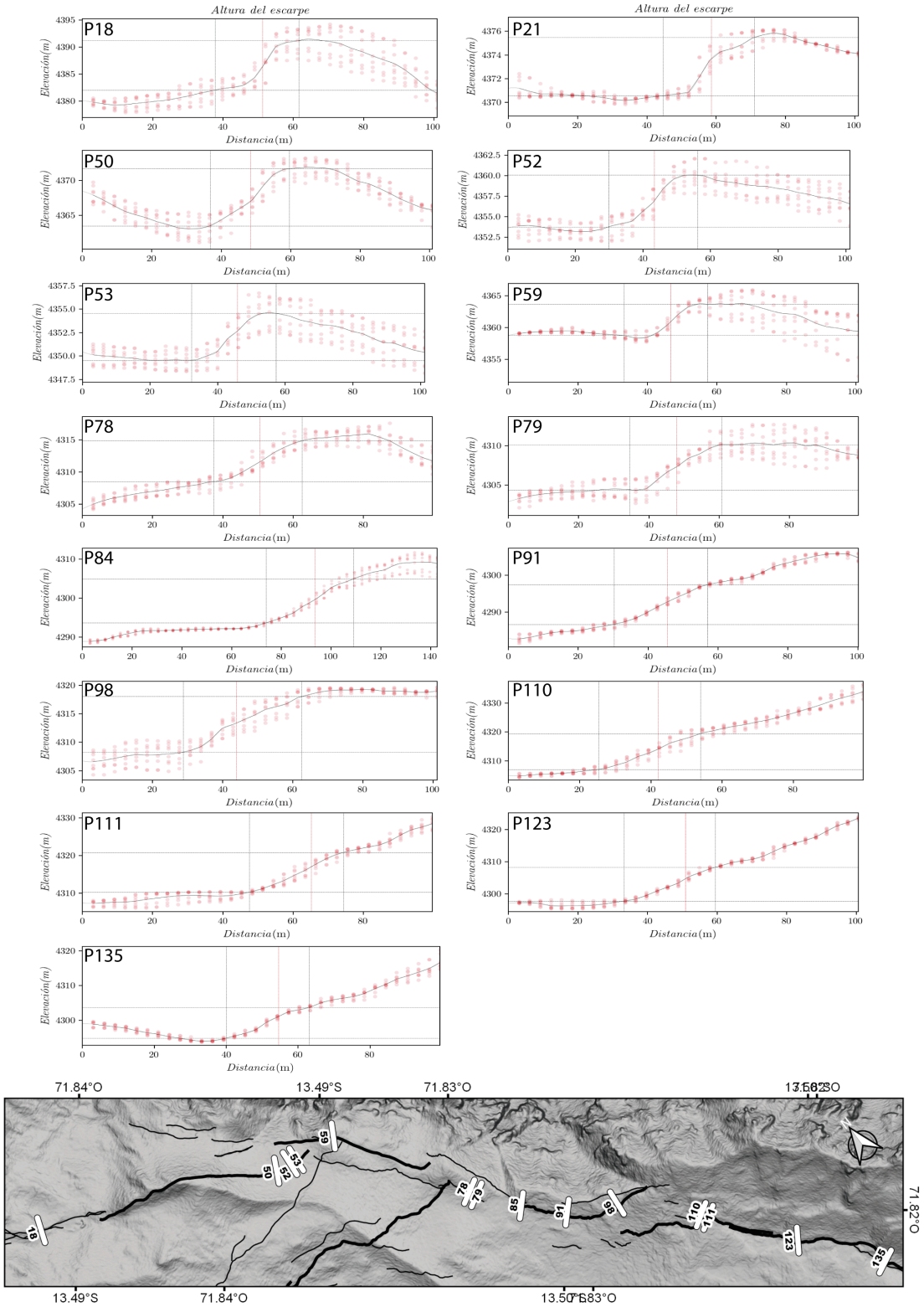


Figura B.14 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (14/22)

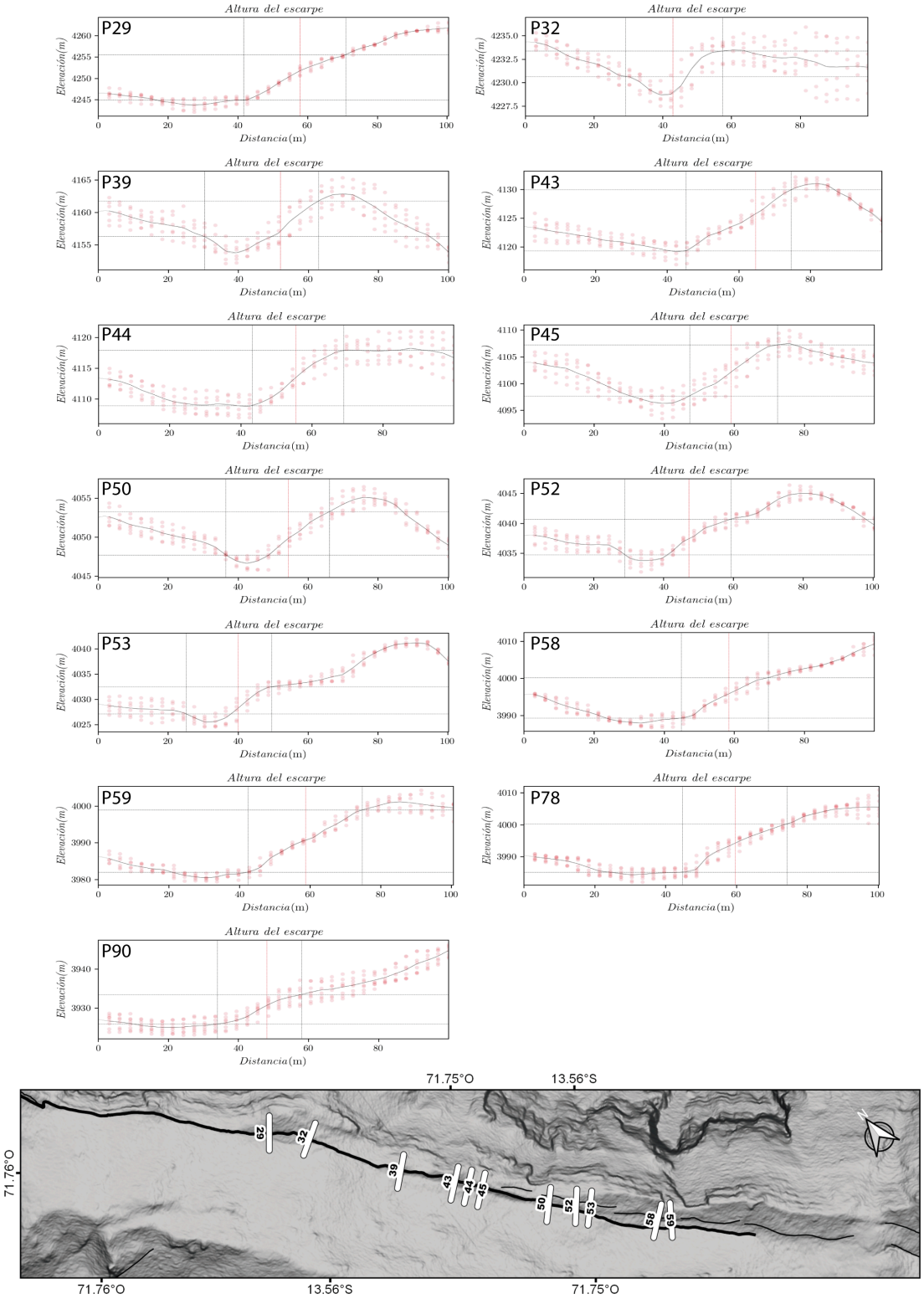


Figura B.15 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (15/22)

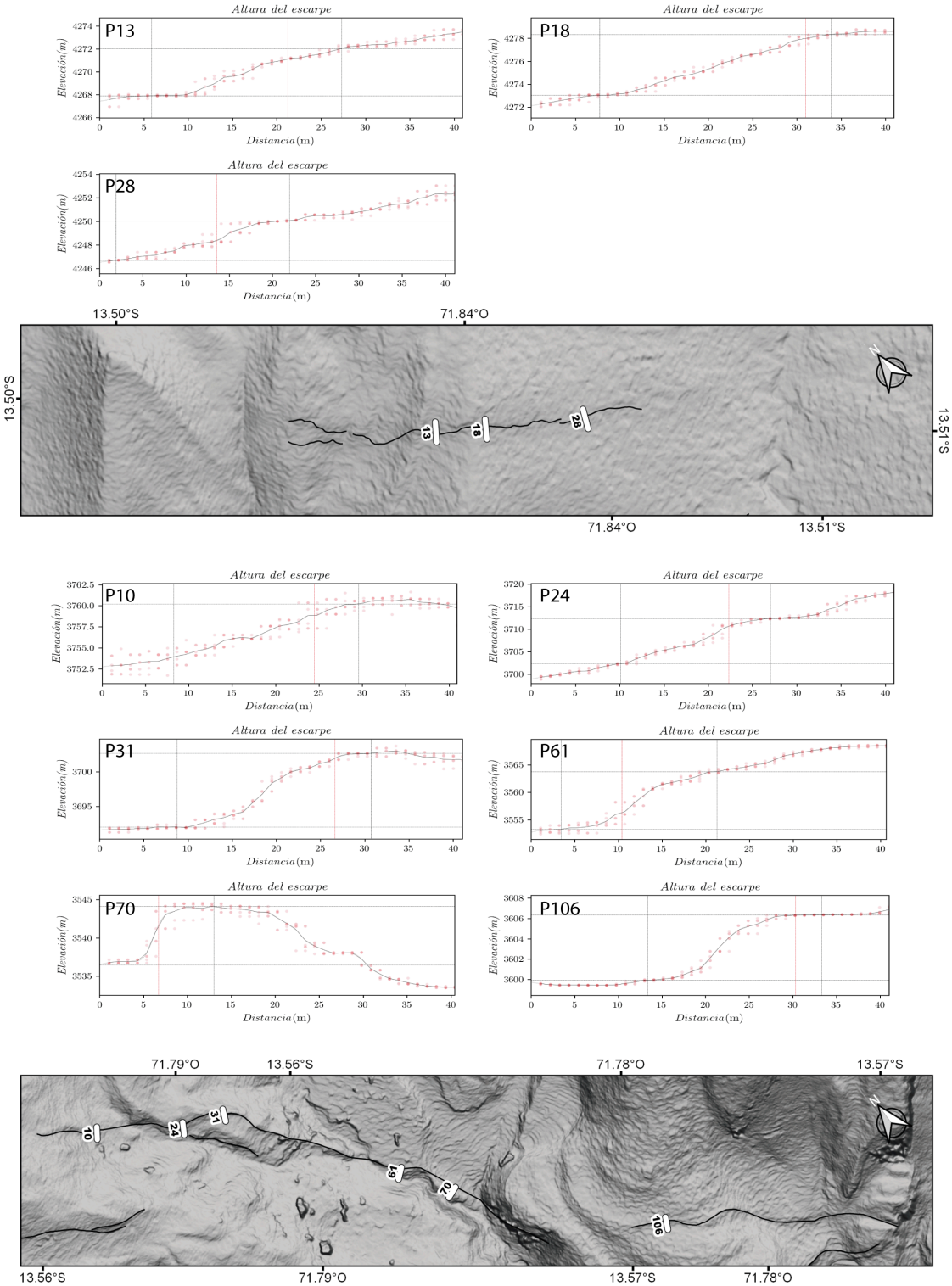


Figura B.16 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (16/22)

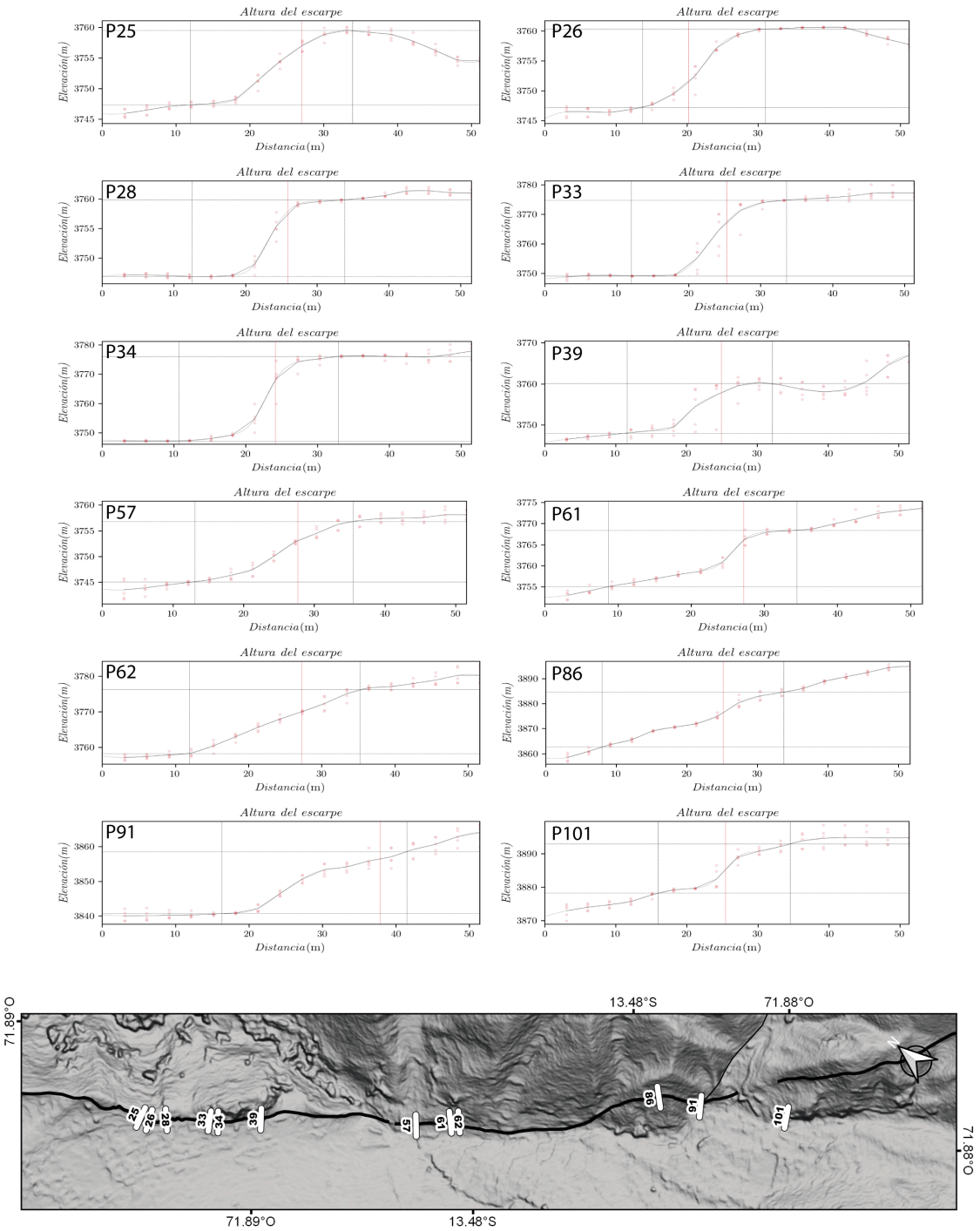


Figura B.17 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (17/22)

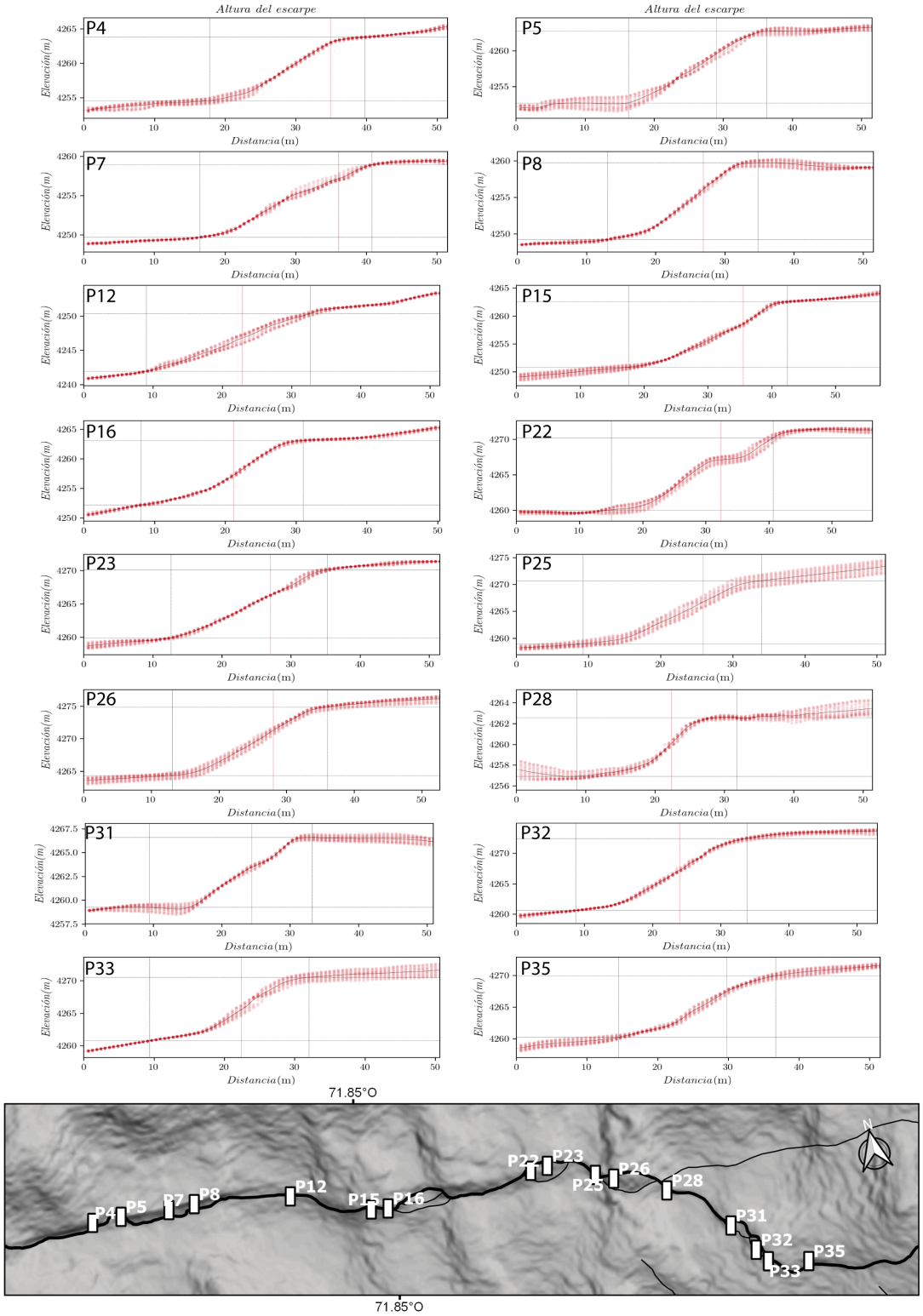


Figura B.18 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (18/22)

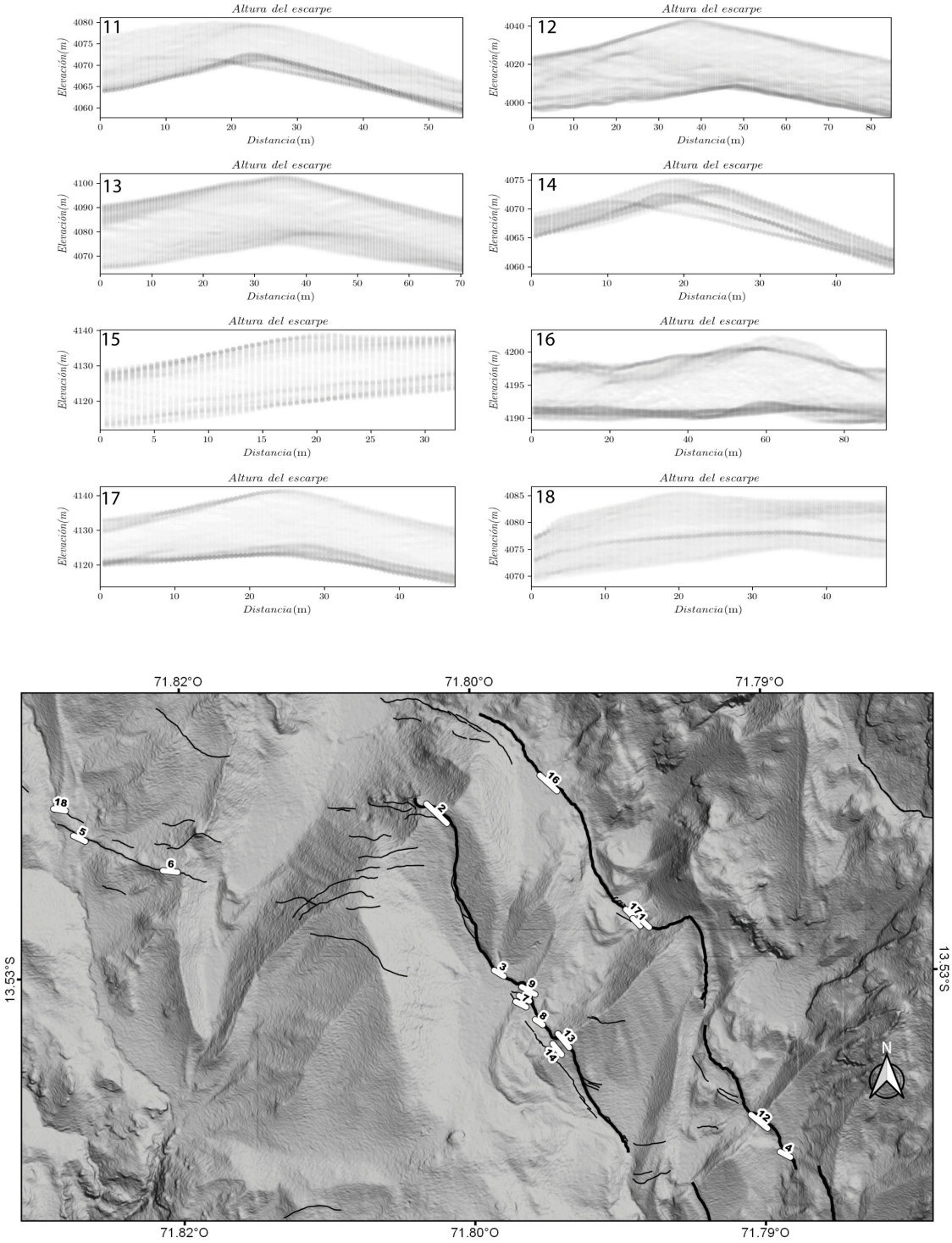


Figura B.19 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (19/22)

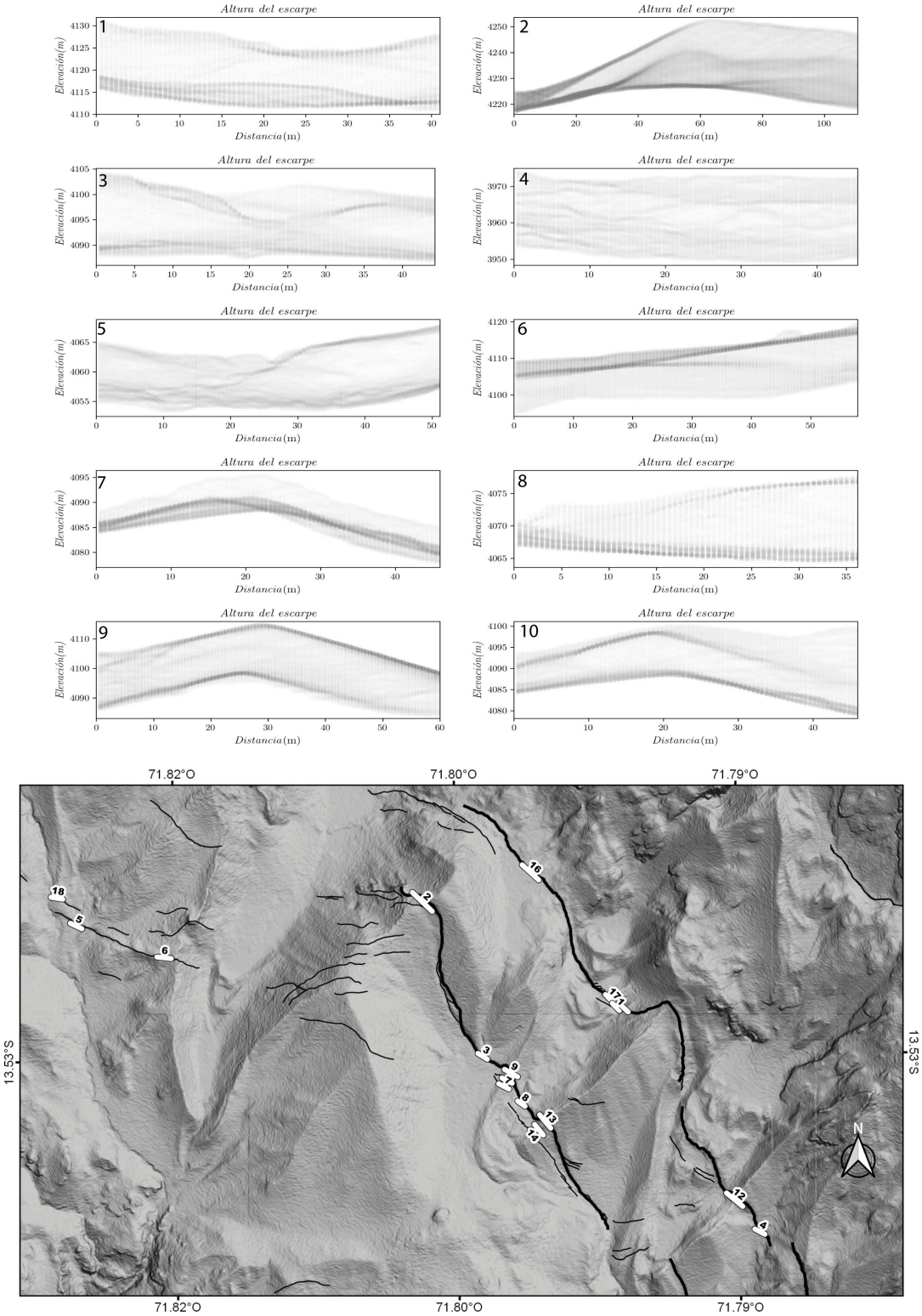


Figura B.20 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (20/22)

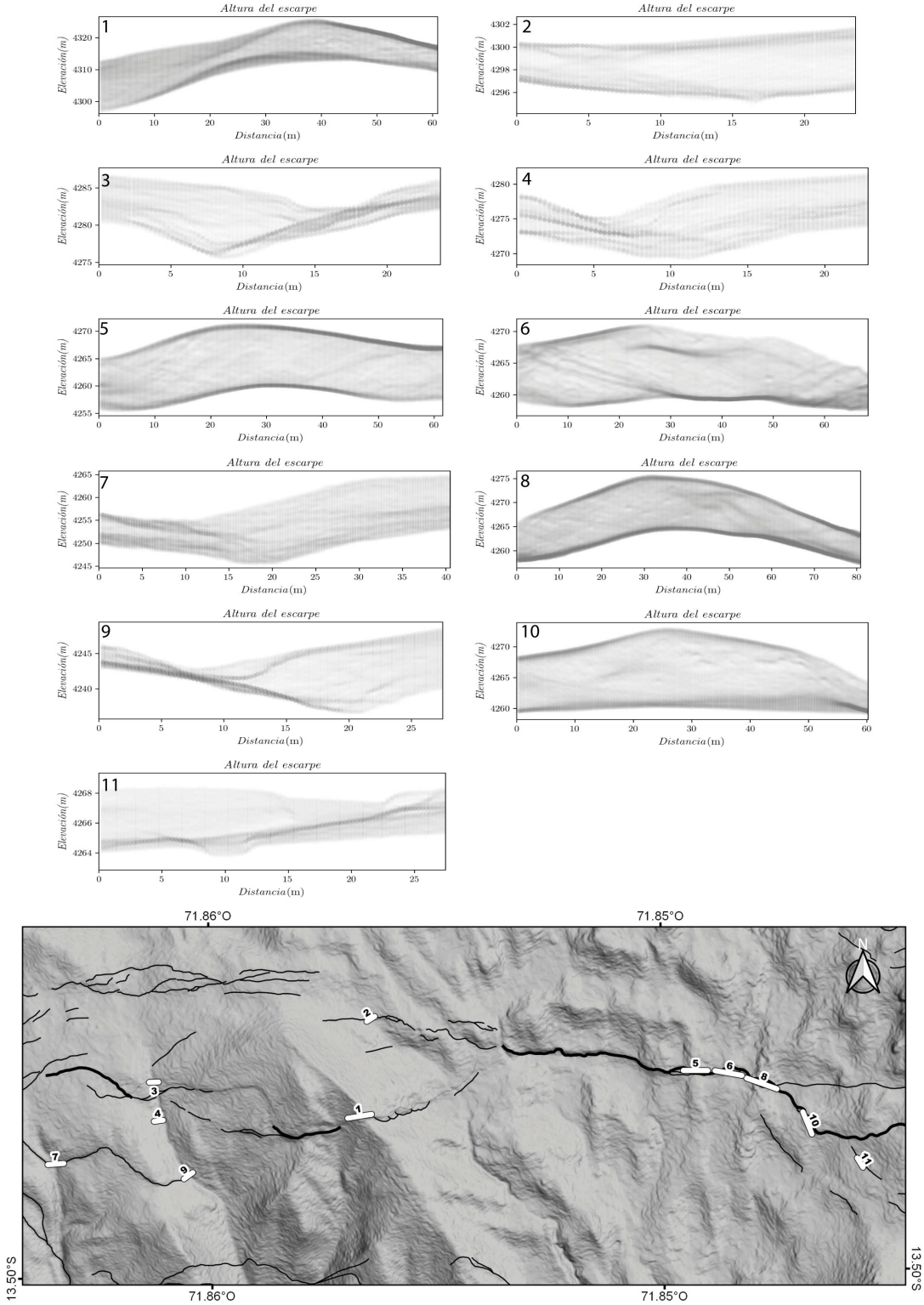


Figura B.21 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (21/22)

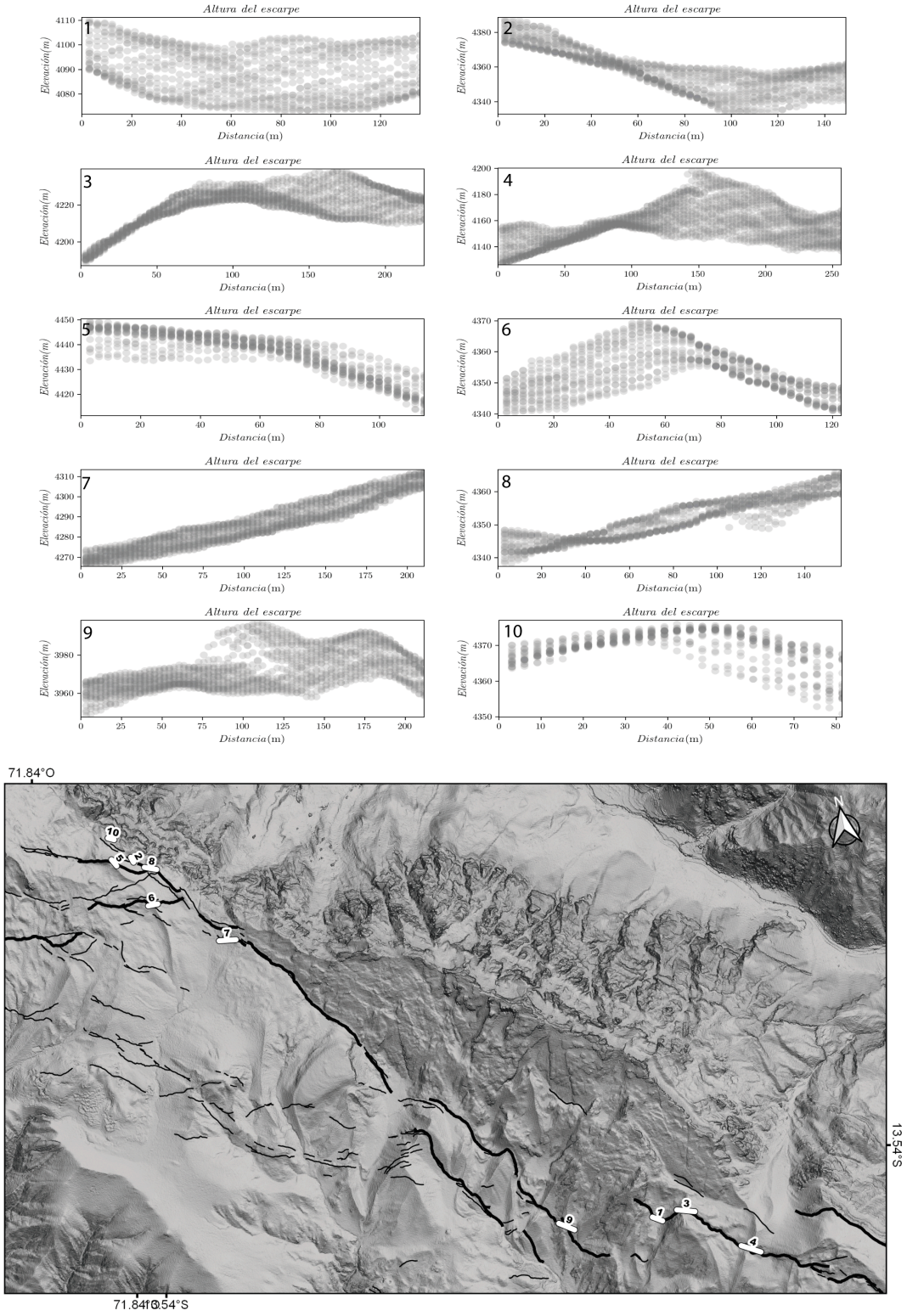


Figura B.22 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (22/22)

Anexo III. Tablas desplazamiento verticales y horizontal

MEDIDAS DE DESPLAZAMIENTO

1. Medidas de desplazamiento horizontal

Tabla C.1

Medidas realizadas para el cálculo del desplazamiento horizontal real

N°	Az perfil 1	Az perfil 2	ΔAz. Falla	d1	d2	Δd	D *(real)*
1	99°	99°	136°	24.0	29.0	26.50	33.2
2	83°	85°	92°	6.8	8.2	7.50	7.6
3	41°	44°	85°	17.0	21.0	19.00	25.8
4	46°	47°	88°	1.5	2.0	1.75	2.3
5	162°	153°	109°	19.0	18.8	18.90	28.5
6	72°	73°	93°	6.3	5.8	6.05	6.5
7	103°	103°	117°	16.7	17.7	17.20	17.7
8	143°	147°	142°	20.2	27.1	23.65	23.7
9	145°	146°	142°	11.8	13.9	12.85	12.9
10	140°	147°	149°	16.0	4.5	10.25	10.3
11	131°	133°	147°	14.8	19.0	16.90	17.5
12	108°	109°	120°	31.4	30.8	31.10	31.7

2. Medidas de desplazamiento vertical

2.1 Medidas del desplazamiento vertical (H) y coordenadas geográficas X e Y (1/3)

Tabla C.2.1

Medidas del desplazamiento vertical (H) y coordenadas geográficas X e Y (1/3)

N°	Y	X	H(m)	N°	Y	X	H(m)
1	-13.496	-71.861	2.8	41	-13.506	-71.852	2.5
2	-13.541	-71.793	11.9	42	-13.498	-71.847	11.8
3	-13.498	-71.858	5.6	43	-13.497	-71.852	9.9
4	-13.501	-71.863	7.8	44	-13.534	-71.804	13.3
5	-13.503	-71.835	3.3	45	-13.498	-71.846	10.9
6	-13.541	-71.792	14.3	46	-13.499	-71.856	8.9
7	-13.496	-71.857	3.1	47	-13.506	-71.852	2.0
8	-13.512	-71.815	5.6	48	-13.497	-71.852	2.4
9	-13.515	-71.812	8.7	49	-13.506	-71.851	3.3
10	-13.498	-71.86	1.9	50	-13.497	-71.852	1.9
11	-13.538	-71.796	17.5	51	-13.506	-71.851	5.6
12	-13.497	-71.853	3.8	52	-13.508	-71.837	5.3
13	-13.553	-71.797	6.3	53	-13.49	-71.84	9.2
14	-13.485	-71.88	14.7	54	-13.544	-71.791	16.9
15	-13.565	-71.785	6.4	55	-13.497	-71.851	4.8
16	-13.497	-71.852	1.6	56	-13.535	-71.802	14.7

continuación…..

N°	Y	X	H(m)	N°	Y	X	H(m)
17	-13.537	-71.796	11.3	57	-13.497	-71.851	5.8
18	-13.504	-71.833	5.0	58	-13.497	-71.854	1.5
19	-13.515	-71.812	7.3	59	-13.496	-71.857	4.1
20	-13.498	-71.86	1.8	60	-13.501	-71.863	6.7
21	-13.504	-71.821	12.5	61	-13.541	-71.783	34.4
22	-13.504	-71.821	10.6	62	-13.496	-71.86	2.9
23	-13.506	-71.852	9.8	63	-13.528	-71.806	16.8
24	-13.497	-71.852	2.1	64	-13.541	-71.792	19.6
25	-13.537	-71.796	14.2	65	-13.497	-71.851	5.0
26	-13.498	-71.847	8.4	66	-13.506	-71.851	4.3
27	-13.543	-71.791	21.2	67	-13.498	-71.845	10.2
28	-13.543	-71.781	19.1	68	-13.536	-71.802	13.7
29	-13.496	-71.859	2.3	69	-13.536	-71.802	17.2
30	-13.506	-71.819	10.6	70	-13.544	-71.791	14.9
31	-13.498	-71.86	1.4	71	-13.498	-71.845	10.2
32	-13.508	-71.838	4.1	72	-13.536	-71.801	18.2
33	-13.498	-71.856	8.2	73	-13.554	-71.795	10.0
34	-13.497	-71.852	2.4	74	-13.545	-71.791	15.7
35	-13.543	-71.781	16.5	75	-13.475	-71.888	12.2
36	-13.509	-71.817	8.8	76	-13.543	-71.778	21.3
37	-13.533	-71.804	19.1	77	-13.504	-71.86	10.2
38	-13.498	-71.86	1.0	78	-13.498	-71.844	11.7
39	-13.506	-71.852	6.0	79	-13.543	-71.778	20.4
40	-13.497	-71.852	8.1	80	-13.498	-71.844	10.5

2.2 Medidas del desplazamiento vertical (H) y coordenadas geográficas X e Y (2/3)

Tabla C.2.2

Medidas del desplazamiento vertical (H) y coordenadas geográficas X e Y (2/3)

N°	Y	X	H(m)	N°	Y	X	H(m)
81	-13.475	-71.888	13.1	121	-13.498	-71.849	9.2
82	-13.499	-71.862	7.2	122	-13.540	-71.794	24.1
83	-13.532	-71.799	14.1	123	-13.496	-71.857	5.6
84	-13.475	-71.888	13.0	124	-13.546	-71.775	21.4
85	-13.499	-71.844	5.7	125	-13.506	-71.857	3.4
86	-13.509	-71.835	3.4	126	-13.499	-71.852	4.2
87	-13.532	-71.799	16.1	127	-13.546	-71.774	22.7
88	-13.504	-71.859	9.8	128	-13.498	-71.851	3.9
89	-13.551	-71.757	10.7	129	-13.555	-71.753	10.7
90	-13.539	-71.800	10.0	130	-13.498	-71.851	4.9
91	-13.529	-71.805	16.8	131	-13.546	-71.774	17.8
92	-13.496	-71.859	3.0	132	-13.547	-71.774	15.7
93	-13.542	-71.792	25.7	133	-13.555	-71.753	9.0
94	-13.507	-71.848	6.4	134	-13.526	-71.803	5.1
95	-13.496	-71.857	5.0	135	-13.556	-71.753	9.6
96	-13.541	-71.797	10.7	136	-13.547	-71.774	19.7
97	-13.496	-71.860	6.0	137	-13.547	-71.774	19.3
98	-13.505	-71.850	6.3	138	-13.547	-71.773	22.1
99	-13.499	-71.853	9.9	139	-13.506	-71.848	6.5
100	-13.499	-71.843	7.3	140	-13.547	-71.773	22.6
101	-13.555	-71.794	10.6	141	-13.547	-71.773	23.0
102	-13.505	-71.850	5.2	142	-13.539	-71.794	28.5
103	-13.552	-71.756	2.7	143	-13.496	-71.859	2.2
104	-13.499	-71.843	11.8	144	-13.498	-71.849	10.1
105	-13.476	-71.888	25.6	145	-13.542	-71.782	11.3
106	-13.499	-71.843	9.7	146	-13.496	-71.857	3.3
107	-13.499	-71.853	5.5	147	-13.501	-71.862	10.2
108	-13.476	-71.888	28.8	148	-13.557	-71.752	5.5
109	-13.499	-71.853	7.0	149	-13.548	-71.773	22.6
110	-13.499	-71.843	9.7	150	-13.493	-71.832	8.2
111	-13.545	-71.776	12.9	151	-13.548	-71.773	23.9

continuación……

N°	Y	X	H(m)	N°	Y	X	H(m)
112	-13.499	-71.852	8.7	152	-13.507	-71.848	3.5
113	-13.506	-71.849	4.3	153	-13.493	-71.831	6.3
114	-13.499	-71.852	7.0	154	-13.548	-71.773	23.3
115	-13.477	-71.887	12.1	155	-13.558	-71.751	5.9
116	-13.528	-71.801	5.6	156	-13.493	-71.831	5.0
117	-13.554	-71.754	5.5	157	-13.558	-71.751	5.3
118	-13.546	-71.775	19.9	158	-13.480	-71.885	11.8
119	-13.506	-71.849	9.3	159	-13.500	-71.858	5.3
120	-13.507	-71.848	5.9	160	-13.559	-71.750	10.9

2.3 Medidas del desplazamiento vertical (H) y coordenadas geográficas X e Y (3/3)

Tabla C.2.3
Medidas del desplazamiento vertical (H) y coordenadas geográficas X e Y (3/3)

N°	Y	X	H(m)
161	-13.559	-71.749	16.9
162	-13.493	-71.830	4.9
163	-13.496	-71.856	2.2
164	-13.496	-71.858	2.1
165	-13.507	-71.847	3.3
166	-13.497	-71.853	3.0
167	-13.539	-71.795	16.3
168	-13.498	-71.861	1.8
169	-13.559	-71.791	10.4
170	-13.480	-71.884	13.3
171	-13.480	-71.884	18.0
172	-13.498	-71.848	9.2
173	-13.507	-71.847	5.4
174	-13.514	-71.813	9.9
175	-13.496	-71.860	1.2
176	-13.496	-71.856	1.6
177	-13.497	-71.853	5.6
178	-13.496	-71.855	1.3
179	-13.498	-71.861	1.8

continuación …….

N°	Y	X	H(m)
180	-13.561	-71.790	7.6
181	-13.498	-71.827	6.4
182	-13.559	-71.750	15.0
183	-13.498	-71.827	5.7
184	-13.498	-71.848	10.5
185	-13.538	-71.795	14.6
186	-13.496	-71.855	2.4
187	-13.496	-71.858	1.7
188	-13.497	-71.853	5.0
189	-13.499	-71.826	11.3
190	-13.483	-71.881	21.9
191	-13.496	-71.855	2.5
192	-13.496	-71.858	1.9
193	-13.504	-71.834	3.8
194	-13.496	-71.856	1.3
195	-13.498	-71.861	2.0
196	-13.538	-71.795	19.8
197	-13.497	-71.853	4.4
198	-13.562	-71.747	7.5
199	-13.501	-71.825	10.8
200	-13.484	-71.881	17.9
201	-13.501	-71.823	9.8

RELACIÓN DE MAPAS E ILUSTRACIONES

Mapas

Mapa — Mapa morfoestructural del sistema de fallas Pachatusan 2020

Figuras

Figura 1.1 Mapa de ubicación y accesibilidad de la zona de estudio (elaboración propia); cartografiado del Sistema de Fallas Cusco en líneas de color negro (Benavente *et al*., 2013)

Figura 2.1 Mapa geomorfológico regional (elaboración propia)

Figura 2.2 Mapa geomorfológico local (elaboración propia)

Figura 2.3 Mapa geológico (Carlotto *et al*., 2011)

Figura 3.1 Las flechas de color rojo señalan el escarpe principal de la Falla Zurite-Huarocondo. Se aprecia un desnivel de la superficie de 100 m, así como escarpes con desniveles más pequeños (6 m), producto de la migración del plano de falla. Fotografía tomada hacia el noreste (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.2 Segmento central de la falla Tambomachay. Se observa un escarpe principal rectilíneo que afecta a depósitos cuaternarios de movimiento normal con componente sinestral. Fotografía tomada hacia el norte (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.3 Contacto fallado entre la Formación Maras y depósitos aluviales. Se observa un escarpe conservado de 5 m de altura. Vista hacia el sur (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.4 Vista de la falla activa Qoricocha. El escarpe tiene 3 m de altitud en esta zona, evidencia de la acumulación de eventos cosísmicos en el sector (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.5 Escarpe de la falla Pachatusan que afecta depósitos glaciares y fluvioglaciares. Se observa un desplazamiento vertical con componente horizontal. Vista al noroeste (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.6 Escarpe de falla normal de la Falla Amaru. Se puede observar el aspecto fresco de la cara o faz libre que nos da idea de su actividad reciente. El escarpe afecta morrenas laterales, así como depósitos aluviales y lacustres (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.7 Segmento principal activo de la de la Falla Zangarará que afecta morrenas y depósitos aluviales con un desplazamiento vertical de 10 metros. Vista tomada hacia el noreste (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.8 Escarpe de falla semicircular debido a la conexión entre los segmentos norte y central de la Falla Langui-Layo. Se observa que la falla afecta morrenas y depósitos lacustres (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.9 Las flechas muestran escarpes de ruptura superficial de la Falla Paruro. El escarpe de falla tiene 10 m de altitud. Asimismo, se observan dolinas adyacentes a la falla (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.10 Faceta triangular asociada a la Falla Acomayo. Se puede observar, al pie del escarpe de falla, una serie de depósitos coluviales producto de las reactivaciones de la falla (Benavente *et al*., 2013).

Figura 3.11 Mapa neotectónico y cinemático (Benavente *et al*., 2013)

Figura 4.1 Superposición entre las fotografías aéreas a, b, c y d de 1956, utilizadas para la generación de un ortomosaico (elaboración propia)

Figura 4.2 (A) ortomosaico de fotografías aéreas de 1956 con una resolución de 2.1 m/px; (B) Modelo de Elevación Digital (DEM) 1956 con una resolución de 2,1 m/px (elaboración propia)

Figura 4.3 (A) combinación del producto multiespectral de 4 bandas; (B) imagen pancromática; (C) imagen de alta resolución *pleiades* (Astrium, 2012)

Figura 4.4 Modelo de Elevación Digital (DEM) y generación de imágenes satelitales *pleiades* 2016 de la zona de Pachatusan, Cusco, con una resolución de 2.1 m/px (elaboración propia)

Figura 4.5 Modelos de Elevación Digital (DEM) procesados a partir de vuelos con *drone* (A) sector noroeste del Sistema de Fallas Pachatusan; (B) sector central del Sistema de Fallas Pachatusan (elaboración propia)

Figura 4.6 Cartografiado del Sistema de Fallas Pachatusan. Las líneas de color negro representan los trazos de falla que afectan depósitos cuaternarios. Las estrellas de color rojo con borde blanco muestran depósitos fluvioglaciares (h1, h2) y depósitos morrénicos (h3) desplazados horizontalmente. Las estrellas de color negro con borde blanco muestran depósitos fluvioglaciares (v1, v2) y depósitos morrénicos (v3) desplazados verticalmente. En estos puntos, se cuantificó el desplazamiento con *swath profiles*, como se explica en las Figuras 4.18, 4.19, 4.20, 4.22, 4.23, 4.24 (elaboración propia).

Figura 4.7 Morrena afectada por falla con un desplazamiento de tipo normal (vista al este)

Figura 4.8 *Swath Profile* para el cálculo de *offset* vertical (elaboración propia)

Figura 4.9 Gráficos de Elevación/Distancia, donde se plotean los datos de elevación del relieve. Cada gráfico presenta una acumulación de datos con tonos más oscuros que nos dan información de dos superficies desplazadas (elaboración propia).

Figura 4.10 Medidas realizadas para el cálculo del desplazamiento real con el método de *Swath Profile*. Se muestra un ejemplo con los dos casos mencionados anteriormente (elaboración propia).

Figura 4.11 Comportamiento de un sistema tipo *Strike-slip* en diferentes etapas de la deformación (Angelier *et al.*, 2003; Woodcock and Fischer, 1986).

Figura 4.12 Proceso de transformación y migración de un *dúplex* (Woodcock and Fischer, 1986)

Figura 4.13 Cartografiado de unidades morfoestructurales del sector central del Sistema de Fallas Pachatusan; cartografiado de los trazos de fallas en líneas de color rojo y los depósitos morrénicos en polígonos cremas (elaboración propia)

Figura 4.14 Cartografiado de unidades morfoestructurales del sector NO del Sistema de Fallas Pachatusan, cartografiado de los trazos de fallas en líneas de color rojo y los depósitos morrénicos en polígonos cremas (elaboración propia

Figura 4.15 Depósitos cuaternarios aluviales desplazados por falla en el sector Amaro (a) imagen satelital de un canal de río que incisa depósitos aluviales afectados por falla con un desplazamiento vertical de tipo normal y un desplazamiento horizontal sinestral; (b) en líneas rojas el trazo de la falla que afecta terrazas aluviales en polígonos amarillos(T1 y T2), estos depósitos sobreyacen rocas de la formación Kayra; (c) desplazamiento horizontal sinestral de 33.2 m medido sobre un DEM *Pleiades* de 2.1 m/px de resolución; (d) desplazamiento vertical normal de 25.6m medido sobre un DEM *Pleiades* de 2.1 m/px de resolución (elaboración propia)

Figura 4.16 Depósitos cuaternarios morrénicos y fluvioglaciares desplazados por falla en el sector Amaro (a) morrena deformada por falla con un claro desplazamiento de tipo normal y un desplazamiento horizontal sinestral; (b) en líneas rojas el trazo de la falla que afecta una morrena representada con polígonos de color crema; (c) desplazamiento horizontal sinestral de 25.8 m medido sobre un DEM de *Drone* de 8 cm/px de resolución; (d) desplazamiento vertical normal de 25.6m medido sobre un DEM *Drone* de 8 cm/px de resolución (elaboración propia)

Figura 4.17 Depósitos cuaternarios morrénicos desplazados por falla en el sector Chincacocha (a) depósito morrénico afectado por falla con un desplazamiento vertical de tipo normal y un desplazamiento horizontal sinestral; (b) en líneas rojas el trazo de la falla que afecta una morrena representado con polígono en color crema; (c) desplazamiento

horizontal sinestral de 17.5 m, medido sobre un DEM de *Drone* de 8cm/px de resolución; (d) desplazamiento vertical normal de 18.2 m, medido sobre un DEM de *Drone* de 8cm/px de resolución (elaboración propia).

Figura 4.18 Sector Matinga (h1 en figura 4.6), medida del desplazamiento transcurrente con el uso de *Swath Profiles*; en a) y b) datos de elevación ploteados en un gráfico *elevación* vs *distancia*, donde se observan tonos oscuros por la acumulación de datos, las superficies cóncavas representan los canales desplazados. (a) *Swath Profile* medido de forma transversal al canal del bloque fijo con un desplazamiento horizontal de 24 m; (b) *Swath Profile* medido de forma transversal al canal del bloque desplazado con un desplazamiento horizontal de 29 m; (c) canal de rio desplazado horizontalmente por falla; las líneas de color verde representan los perfiles transversales a los drenajes desplazados, tanto del bloque desplazado como del bloque fijo; las líneas de color rojo muestran el área donde se realizó el *Swath Profile* (elaboración propia).

Figura 4.19 Sector Cerro Atlas (h2 en figura 4.6), medida del desplazamiento transcurrente con el uso de *Swath Profile*; en a) y b) se observan datos de elevación ploteados en un gráfico *elevación* vs *distancia*, donde se observan tonos oscuros por la acumulación de datos, las superficies convexas representan los lineamientos desplazados. (a) *Swath Profile* medido transversalmente al lineamiento del bloque fijo con un desplazamiento horizontal de 18,8 m; (b) *Swath Profile* medido de forma transversal al lineamiento del bloque desplazado con un desplazamiento horizontal de 19,9 m; (c) lineamiento desplazado horizontalmente por falla; las líneas de color verde representan los perfiles transversales a los drenajes desplazados, tanto del bloque desplazado como del bloque fijo; las líneas de color rojo muestran el área donde se realizó el *Swath Profile* (elaboración propia).

Figura 4.20 Sector Chincacocha (h3 en figura 4.6), medida del desplazamiento transcurrente con el uso de Swath profile; en a) y b) se observan datos de elevación ploteados en un gráfico *elevación* vs *distancia*, donde los tonos oscuros representan la acumulación de datos, con superficies tanto del bloque fijo como del bloque desplazado. (a) *Swath Profile* medido transversalmente a la morrena del bloque fijo con un desplazamiento horizontal de 19 m, (b)*Swath Profile* medido transversalmente a la morrena de bloque desplazado con un desplazamiento horizontal de 16,9 m; (c) morrena con un claro escarpe de falla, producto de un desplazamiento vertical por falla; las líneas verdes muestran los perfiles transversales a las morrenas del bloque desplazado y del bloque fijo; las líneas rojas muestran el área donde se realizó el *Swath Profile* (elaboración propia).

Figura 4.21 Mapa morfoestructural con medidas de desplazamientos horizontales. Se observan desplazamientos mayores a 20 m en los trazos de falla principal. Asimismo, se observan desplazamientos menores a 15 m en la zona central donde se distribuye la deformación (elaboración propia).

Figura 4.22 Sector Huacoto (v1 en figura 4.6), medida del desplazamiento vertical con el uso de *Swath Profile* (a) datos de elevación ploteados en un gráfico *elevación* vs *distancia*, con acumulación de datos en puntos de color rojo, con superficies desplazadas como el escarpe de falla y desplazamiento vertical de 2,3 m; (b) escarpe de falla sobre un depósito fluvioglaciar en la zona de deformación distribuida; la línea verde representa el perfil transversal al trazo de falla; las líneas de color rojo representan el área donde se generó el *Swath Profile* (elaboración propia).

Figura 4.23 Sector Cerro Atlas (v2 en figura 4.6), medida del desplazamiento normal con el uso de Swath profile; (a) datos de elevación ploteados en un gráfico *elevación* vs *distancia*, con una acumulación de datos, representados con puntos de color rojo, con superficies desplazadas como el escarpe de falla y un desplazamiento vertical de 10,5 m; (b) escarpe de falla sobre un depósito fluvioglaciar en el trazo de falla principal, representada por la línea verde, con perfil transversal al trazo de falla; las líneas de color rojo representan el área donde se generó el *Swath Profile* (elaboración propia).

Figura 4.24 Sector Mincaycancha (v3 en figura 4.6), medida del desplazamiento normal con el uso de *Swath profile*; (a) datos de elevación ploteados en un gráfico *elevación* vs *distancia*, con una acumulación de datos, representados en puntos de color rojo, con superficies desplazadas, como el escarpe de falla, con un desplazamiento vertical de 28,5 m; (b) escarpe de falla sobre un depósito morrénico en el trazo de falla principal; la línea verde representa el perfil transversal al trazo de falla, las líneas de color rojo representan el área donde se generó el *Swath Profile* (elaboración propia).

Figura 4.25 Mapa morfoestructural con medidas de desplazamientos verticales. Se observan desplazamientos mayores a 20 m en los trazos de falla principal. Asimismo, se observan desplazamientos menores a 10 m en la zona central donde se distribuye la deformación (elaboración propia).

Figura 4.26 Modelo morfoestructural del Sistema de Fallas Pachatusan (A) en líneas rojas el Sistema de Fallas Cusco (recuadro B) depósitos glaciares afectados por el Sistema de Fallas Pachatusan, a lo largo de él los volcánicos de Rumicolca; (B) comportamiento del Sistema de Fallas Pachatusan con una deformación sinestral-normal y, en la zona de mayor deformación, desplazamientos dextrales afectando depósitos glaciares (elaboración propia).

Figura 4.27 Modelo conceptual donde se muestra la relación de los volcánicos de Rumicolca con el Sistema de Fallas Pachatusan. Se observa un comportamiento transtensivo de las fallas con apertura o dilataciones cerca de la superficie y en profundidad, debido al desplazamiento oblicuo de la falla. Aparentemente, los fluidos volcánicos aprovecharon estas zonas de debilidad para su ascenso a la superficie (elaboración propia).

Figura 5.1 Ubicación de la trinchera paleosismológica (A) ubicación de la trinchera con respecto al escarpe de falla, el bloc diagrama realizado en base un Dem de drone de 8cm/px; (B) mapa con la ubicación de la trinchera con respecto a los depósitos cuaternarios (elaboración propia)

Figura 5.2 Ortomosaico de fotografías de la trinchera paleosismológica excavada (elaboración propia)

Figura 5.3 Tabla comparativa de desplazamiento y magnitud-momento (Wells and Coppersmith, 1994)

Figura 5.4 Foto interpretación de la trinchera paleosismológica Pachatusan (elaboración propia)

Figura 5.5 Reconstrucción paleosismológica de la trinchera en Pachatusan a partir del ortomosaico de fotografías (A) estado inicial de la trinchera; (B) primer evento que desplaza verticalmente 68 cm (elaboración propia).

Figura 5.6 Reconstrucción paleosismológica de la trinchera en Pachatusan a partir del ortomosaico de fotografías. En S1, S2 y S3, observamos las etapas de sedimentación posteriores a la reactivación de F1 (elaboración propia).

Figura 5.7 Reconstrucción paleosismológica de la trinchera en Pachatusan a partir del ortomosaico de fotografías. En C, C1 y C2, tenemos la segunda reactivación F2 con un desplazamiento vertical de 12 cm, así como los procesos de erosión y sedimentación posteriores a la reactivación (elaboración propia).

Figura 5.8 Reconstrucción paleosismológica de la trinchera en Pachatusan a partir del ortomosaico de fotografías. En D y D1, observamos la tercera reactivación F3 con un desplazamiento de 48 cm. Posterior a este evento, observamos la sedimentación de un *sagpond* (elaboración propia).

Figura 5.9 Reconstrucción paleosismológica de la trinchera en Pachatusan a partir del ortomosaico de fotografías. En E, tenemos la última reactivación con un desplazamiento vertical de 15.7 cm que deforma un depósito lacustre reciente (elaboración propia).

Figura 5.10 Reconstrucción esquemática de la trinchera Pachatusan (a) estado inicial de la trinchera cuyos niveles sedimentarios no presentan deformación; (b) evento que deforma los niveles Grv y Mrr produciendo un desplazamiento vertical de 68 cm que provoca la subida del nivel del agua; (c) depositación de la cuña coluvial Cñ1 al pie de la falla producto de la erosión del nivel Grv (elaboración propia).

Figura 5.11 Reconstrucción esquemática de la trinchera Pachatusan (d) etapas de sedimentación lacustre Lc1 erosionada por una canal Cnl; (e) nivel lacustre Lc2 que cubriendo el canal de gravas (elaboración propia).

Figura 5.12 Reconstrucción esquemática de la trinchera Pachatusan (f) segundo evento que deforma parte del footwall en el nivel Mrr y deposita una pequeña cuña coluvial Cñ2 provocando el aumento del nivel del agua; (g) depositación de un canal de gravas Gr2 en respuesta a la basculación y colapso del *hangingwall*; (h) sedimentación de un nivel lacustre Lc3 con el nivel del agua aun alto (elaboración propia).

Figura 5.13 Reconstrucción esquemática de la trinchera Pachatusan (i) tercer evento que deforma los niveles del *hangingwall;* (j) formación de un relieve favorable para la sedimentación del *sagpond* Sgp; (k) última reactivación de falla que afecta el *sagpond* Sgp y los niveles Mrr, Grv (elaboración propia).

Fotografías

Fotografía 4.1 Ubicación de la zona de despegue y aterrizaje del *drone ebee plus* (fotografía de campo)

Fotografía 4.2 Toma de puntos de control con GPS diferencial en la cresta de una morrena (fotografía de campo)

Fotografía 4.3 Pequeñas depresiones o sagponds originadas por la reactivación de una falla y la acomodación del relieve (fotografía aérea en campo con Drone Ebee plus 2018 vista en planta)

Fotografía 4.4 Morrenas y depósitos fluvioglaciares afectados por falla en el sector Huacoto con desplazamiento vertical de una altura de escarpe de 8,5 m (fotografía de campo tomada al este).

Fotografía 5.1 Zona de la trinchera antes de su excavación (fotografía de campo con vista al oeste)

Fotografía 5.2 Excavación de la trinchera paleo sismológica (fotografía de campo)

Fotografía 5.3 Engrillado de trinchera paleosismológica y en el círculo los clavos colocados (fotografía de campo con vista al oeste)

Fotografía 5.4 Muestreo de sedientos para datación (fotografía de campo)

Tablas

Tabla 1.1 Límites de la zona de estudio en coordenadas geográficas

Tabla 4.1 Coordenadas de puntos de control medidos con GPS diferencial

Tabla 4.2 Medidas realizadas para el cálculo del desplazamiento horizontal real (ver figura 4.10)

Tabla 5.1 Resultado de las dataciones por radio carbono C14

Tabla 5.2 Relación del desplazamiento y la magnitud sísmica por evento

Tabla C1 Medidas realizadas para el cálculo del desplazamiento horizontal real

Tabla C.2.1 Medidas del desplazamiento vertical (H) y coordenadas geográficas X e Y (1/3)

Tabla C.2.2 Medidas del desplazamiento vertical (H) y coordenadas geográficas X e Y (2/3)

Tabla C.2.3 Medidas del desplazamiento vertical (H) y coordenadas geográficas X e Y (3/3).

Perfiles

Figura B.1 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (01/22)

Figura B.2 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (02/22)

Figura B.3 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (03/22)

Figura B.4 *Swath Profile* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (04/22)

Figura B.5 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (05/22)

Figura B.6 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (06/22)

Figura B.7 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (07/22)

Figura B.8 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (08/22)

Figura B.9 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (09/22)

Figura B.10 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (10/22)

Figura B.11 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (11/22)

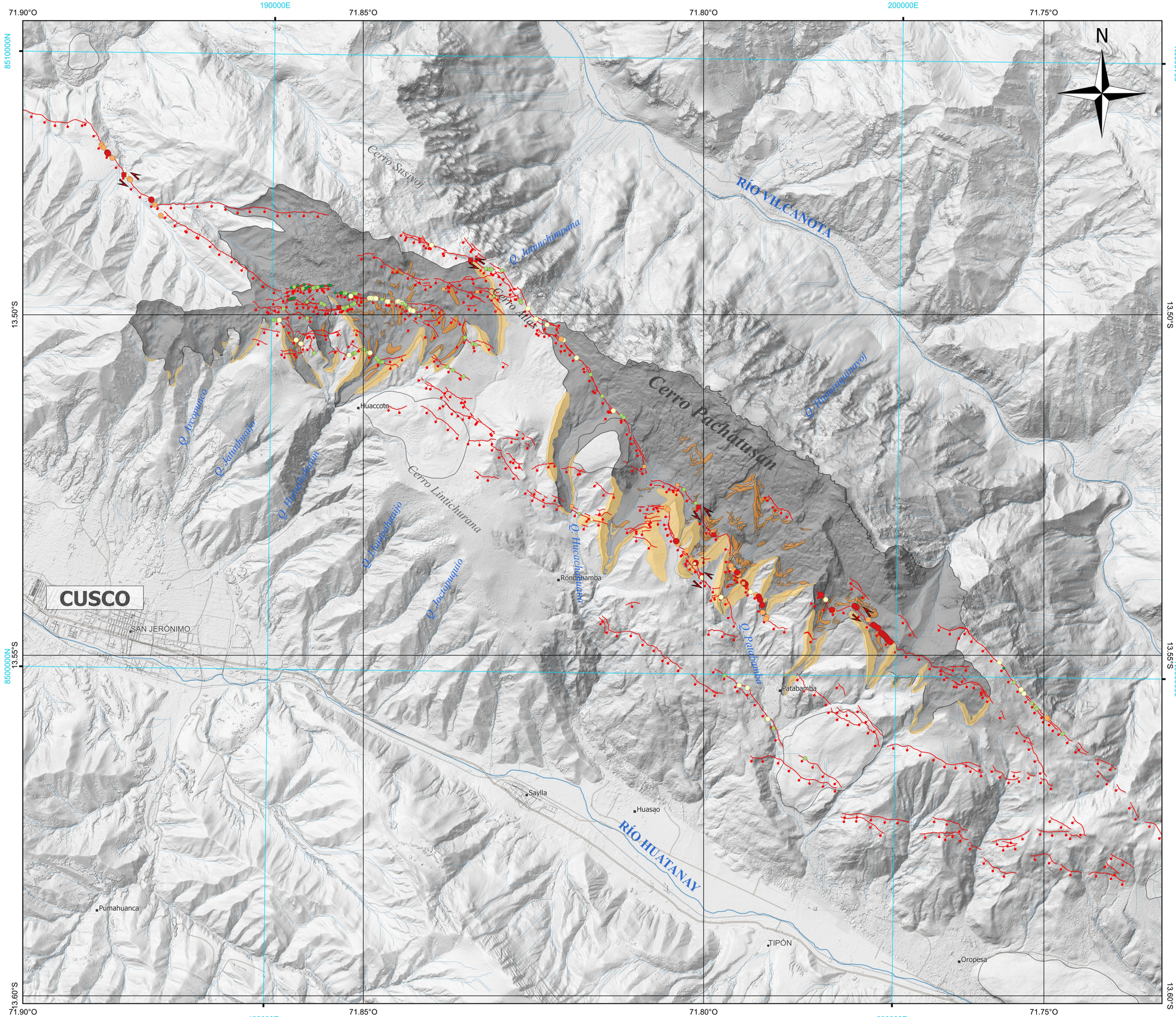
Figura B.12 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (12/22)

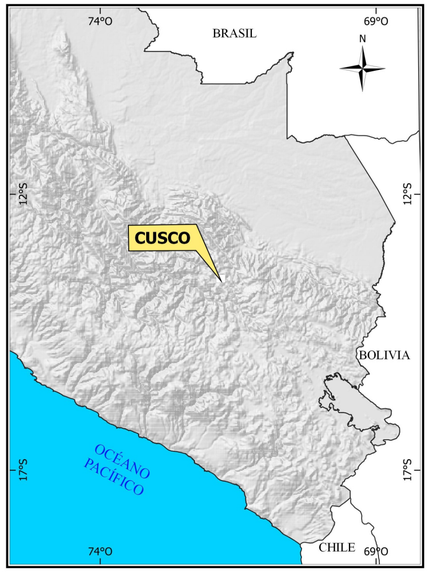
Figura B.13 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (13/22)

Figura B.14 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (14/22)
Figura B.15 *Swath Profile*s realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (15/22)
Figura B.16 *Swath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (16/22)
Figura B.17 S*wath Profiles* realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (17/22)
Figura B.18 *Swath Profile*s realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (18/22)
Figura B.19 *Swath Profile*s realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (19/22)
Figura B.20 *Swath Profile*s realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (20/22)
Figura B.21 *Swath Profile*s realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan (21/22)
Figura B.22 *Swath Profile*s realizados en el Sistema de Fallas Pachatusan

INGEMMET

Av. Canadá 1470 - San Borja, Lima 41, Perú
Teléfono: 051 - 1- 618 9800
Fax: 051-1-225-3063 I 051-1-225-4540
www.gob.pe/ingemmet
comunicacion@ingemmet.gob.pe





SIMBOLOGÍA

- Fallas normales
- Aeropuerto
- Distrito
- Catastro Urbano
- Camino carrozable
- Camino de herradura
- Carretera afirmada transitable
- Carretera asfaltada Dos o mas vias
- Ferrocarril
- Ríos
- Localidades
- Laguna

Depósitos deformados

- Morrenas de 14000 años
- Morrenas holocenas
- Avance glacial
- Volcanicos de Rumicolca

Desplazamiento Horizontal (metros)	Desplazamiento Vertical
0 - 5	0.0 - 5.0
5 - 10	5.0 - 10.0
10 - 15	10.0 - 20.0
15 - 20	20.0 - 20.0
>20	> 20

REPÚBLICA DEL PERU

SECTOR DE ENERGIA Y MINAS

INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO

SECTOR ENERGÍA Y MINAS
INGEMMET
INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO

MAPA MORFOESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE FALLAS PACHATUSAN

Palomino, A.[1]; Benavente, C.[1]; Rosell, L.[1] Aguirre, E.[1] & Garcia, B.[1]

[1]Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET

0 1 2 km

1:25,000

Sistema de coordenadas geográficas WGS 1984