

Informe Técnico A6671

Reactivación del Segmento Activo
Misca-Cusibamba
Falla Paruro
Cusco

Sismo 27/09/2014

FABRIZIO DELGADO M.
LIONEL FIDEL S.
RONALD CONCHA N.

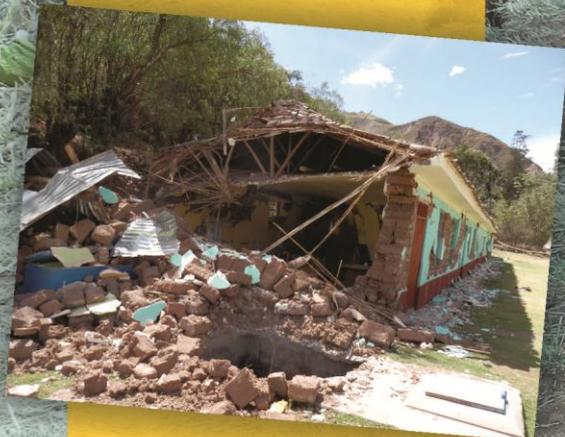
Noviembre, 2014



SECTOR ENERGÍA Y MINAS

INGEMMET

INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO



CONTENIDO

1.0	INTRODUCCIÓN	3
2.0	PARÁMETROS DEL SISMO	3
3.0	CONCEPTOS BÁSICOS	5
4.0	CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO	5
4.1	CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO	5
4.2	CONTEXTO GEOLÓGICO	5
5.0	DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA – ESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE FALLAS CHINCHAIPUJIO – PARURO – ACOMAYO	9
6.0	EFFECTOS COSISMICOS	14
6.1	EFFECTOS GEOLÓGICOS	14
6.2	EFFECTOS EN LAS CONSTRUCCIONES	24
7.0	LOCALIDADES AFECTADAS	31
7.1	LOCALIDAD DE MISCA	31
7.2	LOCALIDAD DE CUSIBAMBA BAJO	40
	CONCLUSIONES	48
	RECOMENDACIONES	49
	REFERENCIAS	51
	ANEXO 1: Mapas de peligrosidad sismo 27/09/2014	52
	ANEXO 2: Zonas críticas a los peligros geológicos en la provincia de Paruro, Cusco	57
	LISTADO DE FOTOS Y FIGURAS	63

REACTIVACIÓN DEL SEGMENTO ACTIVO MISCA-CUSIBAMBA FALLA PARURO

PARURO – CUSCO

1.0 INTRODUCCIÓN.

El día sábado 27 de setiembre de 2014 a las 21:35 (Hora local), ocurrió un sismo de magnitud 5.1 ML (escala de Richter), con epicentro a 7 km al suroeste de Paruro y una profundidad de 6 Km (Fuente: IGP) (Ver figura 01).

El movimiento sísmico causó daños importantes en las localidades de Misca, Mollejato, Cusibamba Bajo y Moyoc y en menor intensidad en las localidades aledañas del distrito de Paruro, provincia de Paruro.

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET, por intermedio de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico – DGAR, comisionó a los profesionales Lionel Fidel Smoll, Fabrizio Delgado Madera y Ronald Concha Niño de Guzman, para realizar la evaluación del área afectada. Los trabajos se realizaron del 29 de setiembre al 02 de octubre del presente año en coordinaciones con CENEPRED e INDECI.

Es importante mencionar que en junio de 2014, INGEMMET presentó el Boletín “Neotectónica y peligro sísmico en la región Cusco” (Benavente et.al, 2013); estudio que pone en evidencia un total de 53 estructuras plio-cuaternarias (entre ellas fallas activas) en la región. Los estudios detallados de las fallas, permitieron generar mapas de amenaza sísmica para movimientos en masa y procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos. Estos mapas, se calcularon a partir de las interacciones entre los mapas de susceptibilidad (a movimientos en masa y a procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos) y los mapas de iso-aceleraciones sísmicas deducidos de la magnitud máxima posible que una falla activa puede generar, para posteriormente elaborar los mapas de peligrosidad de movimientos en masa y procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos detonados por sismos; estos análisis se efectuaron para las fallas activas en la región Cusco, dentro de ellas se tomó como escenario la falla Paruro, determinando el grado de peligrosidad alta, media y baja.

El presente informe contiene información de campo (en la evaluación del sismo y las realizadas anteriormente para la confección del Mapa Neotectónico de la región Cusco); así como la revisión de información geológica y cartográfica (boletines técnicos, topografía e imágenes satelitales) que permitieron la evaluación post-sismo, y su influencia en la población, infraestructura y terrenos. Se emiten conclusiones y recomendaciones que los gobiernos locales, provinciales e instituciones inmersas en el tema de desastres y prevención deberán tener en cuenta para la gestión adecuada del territorio.

2.0 PARÁMETROS DEL SISMO

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) con los datos obtenidos a través de su Red Sísmica Nacional ha determinado los siguientes parámetros hipocentrales (Fuente: IGP).

- Día : 27 de setiembre
- Tiempo Origen : 21h 35m 28.0seg. (Hora Local).
- Latitud Sur : -13.81°
- Latitud Oeste : -71.89°
- Profundidad : 6 km
- Magnitud : 5.1ML (Richter).
- Intensidad : VII (MM) Misca.
 VI (MM) Cusibamba, Toroy, Moyoc.
 V (MM) Colcha, Rondocán.
 IV-III (MM) Yaurisque, Huanoquite.
 III (MM) Cusco, Omacha.
 III-II (MM) Ccapi.
 II (MM) Urubamba, calca, Anta, Yanaoca, Huancarani.

Las observaciones de campo y cartografiado post sismo indican que se reactivó un segmento de la falla Paruro, denominado Misca – Cusibamba. Cabe resaltar que la falla Paruro forma parte del Sistema de las fallas Chinjaipujio – Paruro – Acomayo (Benavente et al., 2013). No se ha localizado desplazamiento superficial (salto de falla), sólo las grietas cosísmicas, identificadas en el terreno, alineadas a lo largo de la falla.

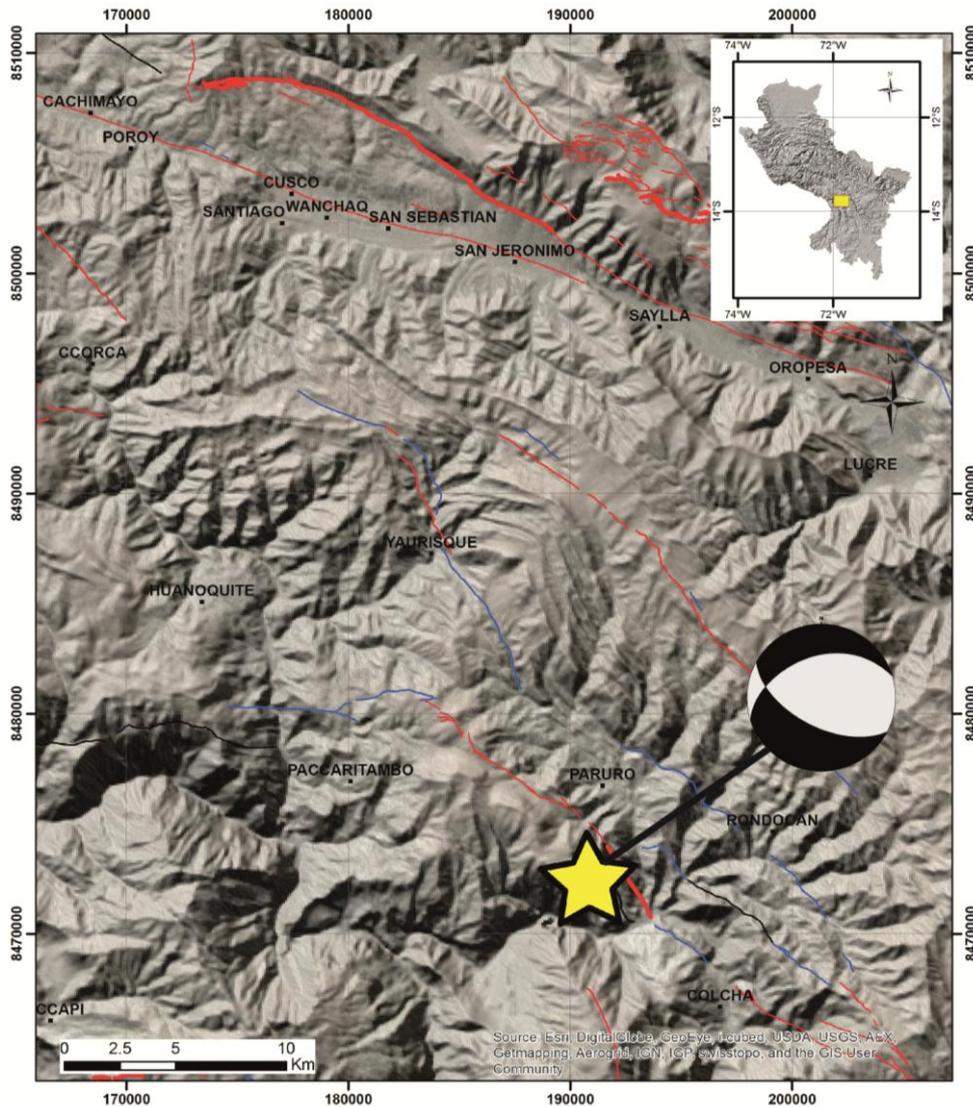


Figura 01: Mapa de ubicación del sismo del 27 de setiembre del 2014, el mecanismo focal (Fuente: IGP) indica un movimiento de tipo normal con una componente sinestral.

3.0 CONCEPTOS BÁSICOS

Para comprender el concepto de **falla geológica activa**, debemos tener en claro los siguientes temas:

- a) **Falla Geológica:** Son discontinuidades singulares que corresponden a planos de rotura o fracturación con desplazamiento relativo entre los bloques. Su origen es tectónico, es decir producto de los esfuerzos internos de la tierra. Tomado de Ingeniería Geológica (Gonzales de Vallejo et al, 2002).
- b) **Estructura Tectónica Capaz / Falla Activa:** Es una estructura tectónica (falla geológica) que puede generar terremotos o deformaciones en la superficie, es decir una **falla activa**. El concepto de falla activa se define en función de la edad de su último desplazamiento. Bajo el punto de vista neotectónico, es la que ha presentado deformaciones durante el régimen tectónico actual. Bajo el punto de vista de la ingeniería geológica y su aplicación a proyectos de ingeniería (obras de infraestructura), las fallas activas son las que han presentado movimiento en los últimos 10 000 años. Tomado de Ingeniería Geológica (Gonzales de Vallejo et al, 2002).
- c) **Sismo:** Proceso de liberación de energía acumulada en la corteza terrestre, que es reflejada en superficie mediante sacudidas en el terreno causando daños y destrucción.
- d) **Relación fallas activas y sismos:** esta relación se da de la siguiente forma, primero se tiene la estructura (falla geológica), esta, al interior de la corteza terrestre origina una ruptura la que posteriormente genera una liberación de energía en forma de ondas que conocemos como sismo, este movimiento ondulado llega a la superficie y su amplificación de ondas en superficie está condicionado por el tipo de suelo.

4.0 CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO

4.1 CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO

La zona evaluada se caracteriza por presentar montañas escarpadas (cerros Yotocasa - 4100 msnm y Huayruro - 4250 msnm) disectadas por ríos que formando valles profundos con laderas de pendientes de hasta 60°.

El poblado de Misca se encuentra asentado sobre cono deluvial; es decir sobre depósitos de antiguos flujos de barro que descienden del cerro Yotocasa.

El poblado de Cusibamba se encuentra emplazado sobre una terraza aluvial del río Paruro que desemboca en el río Apurímac a 2700 msnm.

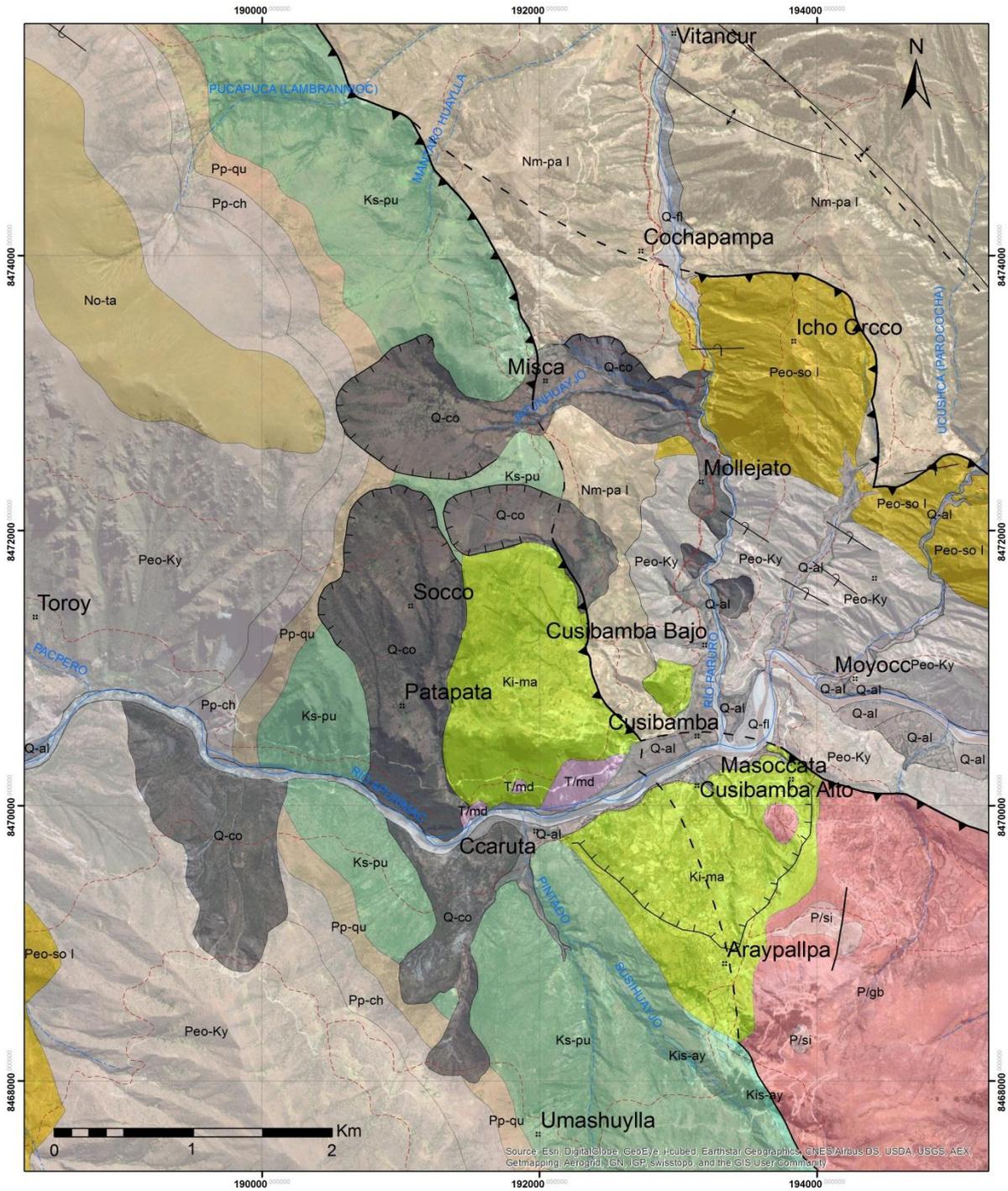
4.2 CONTEXTO GEOLÓGICO

El área afectada por el sismo se caracteriza por presentar mayormente afloramientos de rocas sedimentarias y en menor proporción rocas intrusivas (Carlotto et al., 1996; Carlotto et al., 2011). La edad de estas rocas varía desde el Cretácico medio hasta el cuaternario (Figura 02).

- **Grupo Yuncaypata (Cretácico medio-superior)** Se presentan en las montañas al suroeste de Paruro; cerca a los poblados de Misca,

Cusibamba y Araypallpa; este grupo ha sido dividido en cuatro formaciones, pero en el área de estudio se observan tres: **La Formación Maras**; conformada por lutitas, limolitas, yesos y lentes de caliza que se presentan de manera caótica; Las calizas presentes en la zona de estudio corresponden a la **Formación Ayavacas**, que se presentan en afloramientos aislados dentro de la masa de lutitas y yesos de la formación Maras; y **La Formación Puquín**; se trata esencialmente de lutitas negras y rojas, intercaladas con capas e yesos y localmente por capas de areniscas de origen fluvial. En estas dos formaciones se desarrollan grandes deslizamientos y hacen que los terrenos sean relativamente estables.

- **Formaciones Quilque y Chilca (Paleoceno inferior y superior)** Están compuestas de lutitas, areniscas, microconglomerados y conglomerados de color rojo, con un espesor medio de entre 100 y 200m; afloran en la parte alta de las montañas al oeste de Misca y Cusibamba.
- **Grupo San Jerónimo (Eoceno medio-Oligoceno inferior)** Está conformado por las formaciones Kayra y Soncco. En la zona de estudio estas dos unidades están reconocidas ampliamente en las laderas cercanas a Toroy y Cusibamba bajo; la **Formación Kayra**; constituida por areniscas feldespáticas, intercalada con lutitas rojas; y la **Formación Soncco**; constituido por lutitas rojas, areniscas y conglomerados con clastos volcánicos en la parte superior.
- **Grupo Tacaza (Oligoceno superior)** Se trata principalmente de conglomerados de conos aluviales, con areniscas feldespáticas, esta unidad aflora en la cima del cerro Yotocasa al suroeste del poblado de Paruro.
- **Formación Paruro (Mioceno superior)** Conformado por lutitas y limolitas lacustres, areniscas y mayormente conglomerados en la parte superior que está asociado al sistema de fallas Yaurisque – Papres. Esta unidad aflora en las laderas bajas y medias del valle de Paruro.
- **Depósitos coluviales**, se forman en las laderas de las montañas, conformados por una mezcla de arenas, limos y arcillas; estos depósitos incluyen a los deslizamientos como el originado en la parte alta de Misca.
- **Depósitos aluviales**, corresponden a los conos o abanicos y a las terrazas aluviales, las que se hallan tanto en la desembocadura de la quebrada Paruro como en el fondo de valle del río Apurímac, están constituidos por gravas y bloques envueltos en una matriz areno-arcillosa.
- **Depósitos fluviales**, estos depósitos han sido reconocidos en el fondo de los valles, donde están constituidos por bancos de gravas y arenas.
- **Rocas intrusivas** se observan principalmente en el cerro Huayruro al sur de Cusibamba, y en las laderas bajas del valle del río Apurímac, se trata de gabros del macizo de Acomayo – Colcha que corta rocas mesozoicas de las formaciones Maras y Ayavacas, existen también sienita y microdioritas que cortan estos gabros.



Leyenda			Simbología		
	Dep. Fluvial		Fm. Soncco		Fm. Ayavacas
	Dep. Aluvial		Fm. Kayra		Fm. Maras
	Dep. Coluvial		Fm. Chilca		Gabro
	Fm. Paruro		Fm. Quilque		Sienita
	Gpo. Tacaza		Fm. Puquín		Microdiorita
	Anticlinal		Vías		Ríos
	Sinclinal		Pueblos		
	Capa Invertida				
	Falla Inversa				
	Escarpe de Deslizamiento				

Figura 02: Mapa geológico de la zona de evaluada. La falla Paruro evidencia movimientos inversos antiguos (Modificado de Carlotto et al., 2011), pero durante el cuaternario y la actualidad su cinemática es de tipo normal (ver figura 03).

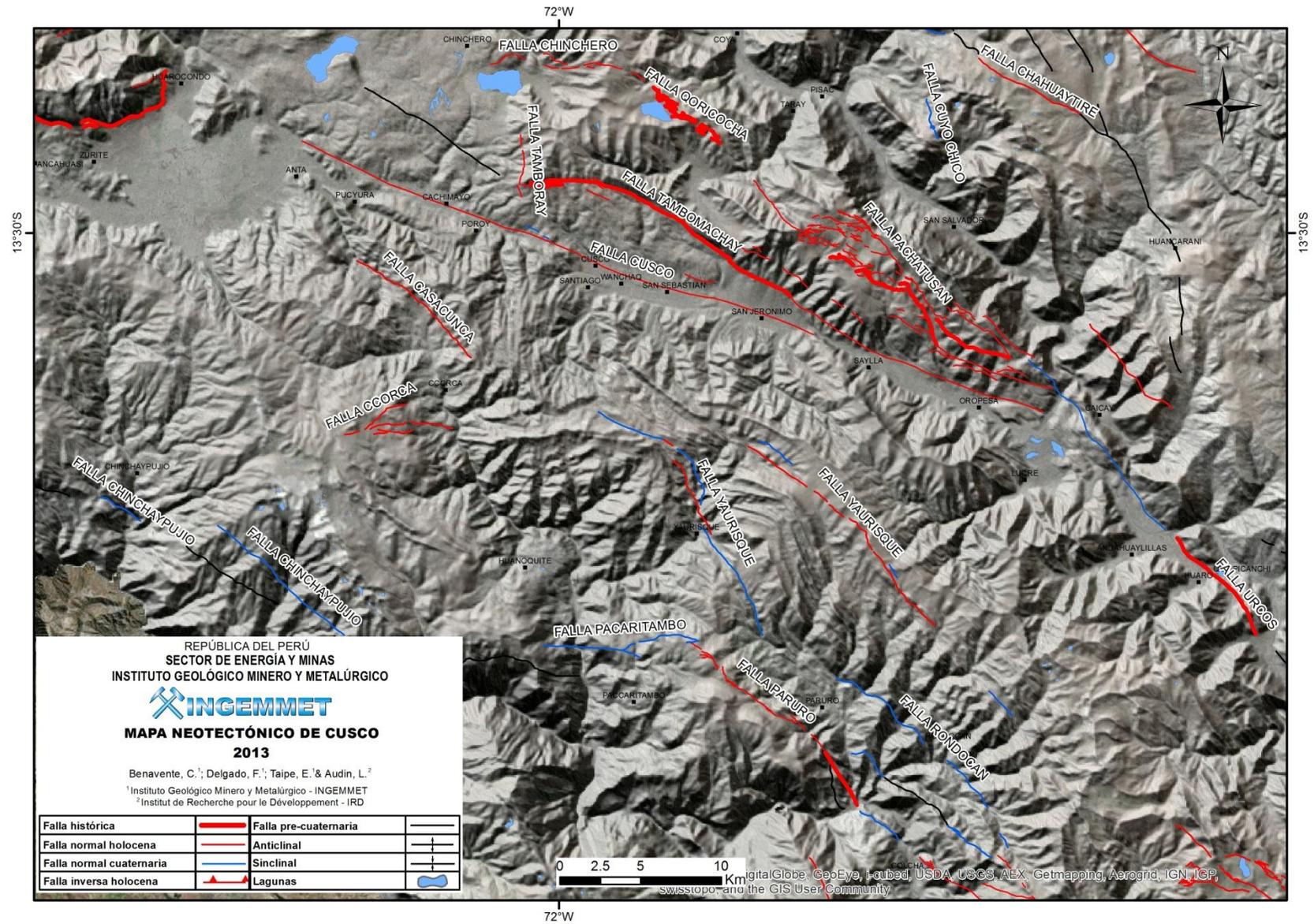


Figura 03: Distribución de fallas en la región Cusco, donde se observa que la falla Paruro es una estructura, que tiene un movimiento de tipo normal durante el cuaternario y la actualidad (Benavente et.al, 2013).

5.0 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA – ESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE FALLAS CHINCHAYPUJIO – PARURO – ACOMAYO

El sismo de setiembre último tuvo como escenario la zona de influencia del sistema de fallas Chinchaypujio – Paruro – Acomayo como se puede apreciar en la figura 04 (Benavente et.al, 2013). Este sistema se desarrolla en una longitud aproximada de 75 kilómetros. Hacia el sur se puede reconocer este sistema por la localidad de Acomayo, en donde presenta una dirección promedio de N120°E, siendo subparalela al sistema de falla Casacunaca-Acomayo-Langui-Layo. La parte central presenta una deflexión similar a la falla Zurite-Huarocondo, en donde adopta una dirección aproximada este-oeste. Mientras que la prolongación norte vuelve a tener dirección andina.

A lo largo del sistema de fallas Chinchaypujio – Paruro – Acomayo, que corresponden a una reactivación o reactivaciones de una estructura geológica antigua, se observan fallas que cortan depósitos recientes (aluviales, coluviales, fluvio-glaciares), mostrando así su actividad a lo largo del tiempo (Cuaternario).

Benavente et.al, 2013 pone en evidencia la actividad tectónica de este sistema de fallas, la que está conformada por la falla Chinchaypujio, falla Pacaritambo, falla Paruro y la falla Acomayo. La reactivación de un segmento de la falla Paruro, situada al sureste de esta, produjo el sismo del 27 de setiembre.

La falla Paruro se extiende con dirección N150°E y buzamiento de 65°-70° hacia el oeste a lo largo de 11 kilómetros, entre los poblados de Yaurisque y Paruro. La deformación de esta falla se distribuye mediante un escarpe principal que generó un desplazamiento máximo vertical de 25 metros. Sólo en la sección norte, la falla se divide en 4 escarpes, generando según su distribución una estructura en echelón o cola de caballo (Figura 05). En la parte central tiene una dirección noroeste-sureste, donde se presenta un escarpe principal con dirección N150°. (Figura 06).

La falla pone en contacto areniscas feldespáticas y lutitas de coloración rojiza de la Formación Puquín con depósitos aluviales y fluviales (Foto 1), asimismo se observan a lo largo de la traza facetas triangulares bien conservadas de 10 metros de altitud.

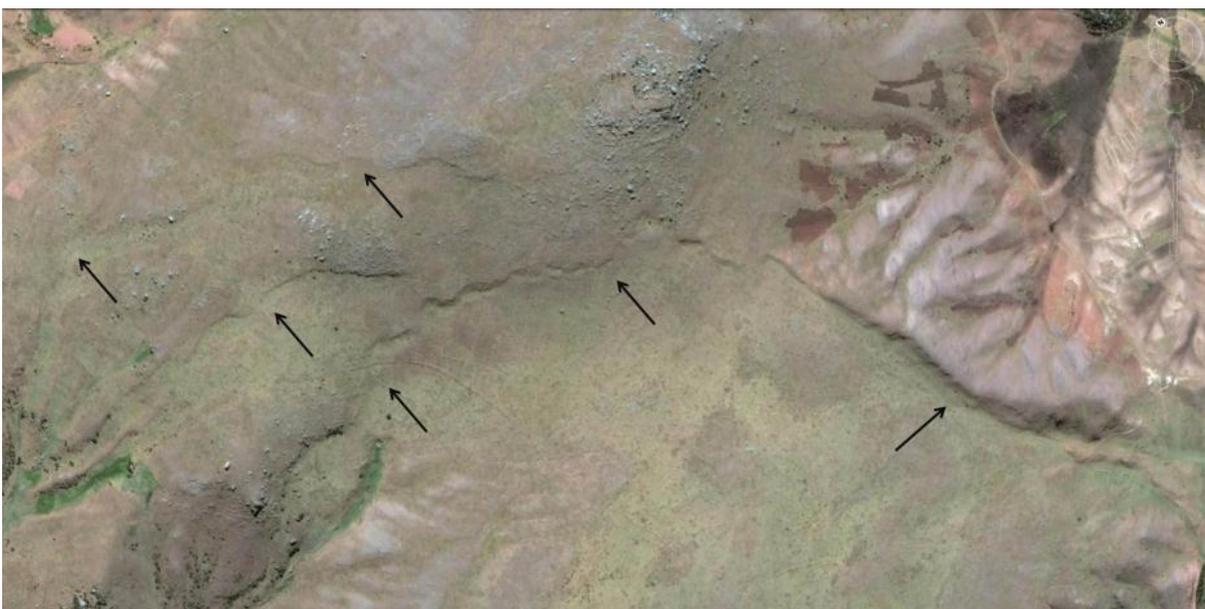


Figura 05: Segmento norte de la Falla Paruro donde se muestra la distribución de la deformación en estructura tipo cola de caballo o echelón. (Ver flechas).

CU-05	SISTEMA DE FALLAS CHINCHAYPUJIO-PARURO-ACOMAYO	Normal	
CU-05_a	Falla Chinchaypujio	Normal	< 2.5 millones de años
CU-05_b	Falla Pacaritambo	Normal	< 2.5 millones de años
CU-05_c	Falla Paruro	Normal	< 10 000 años
CU-05_d	Falla Acomayo	Normal	< 10 000 años

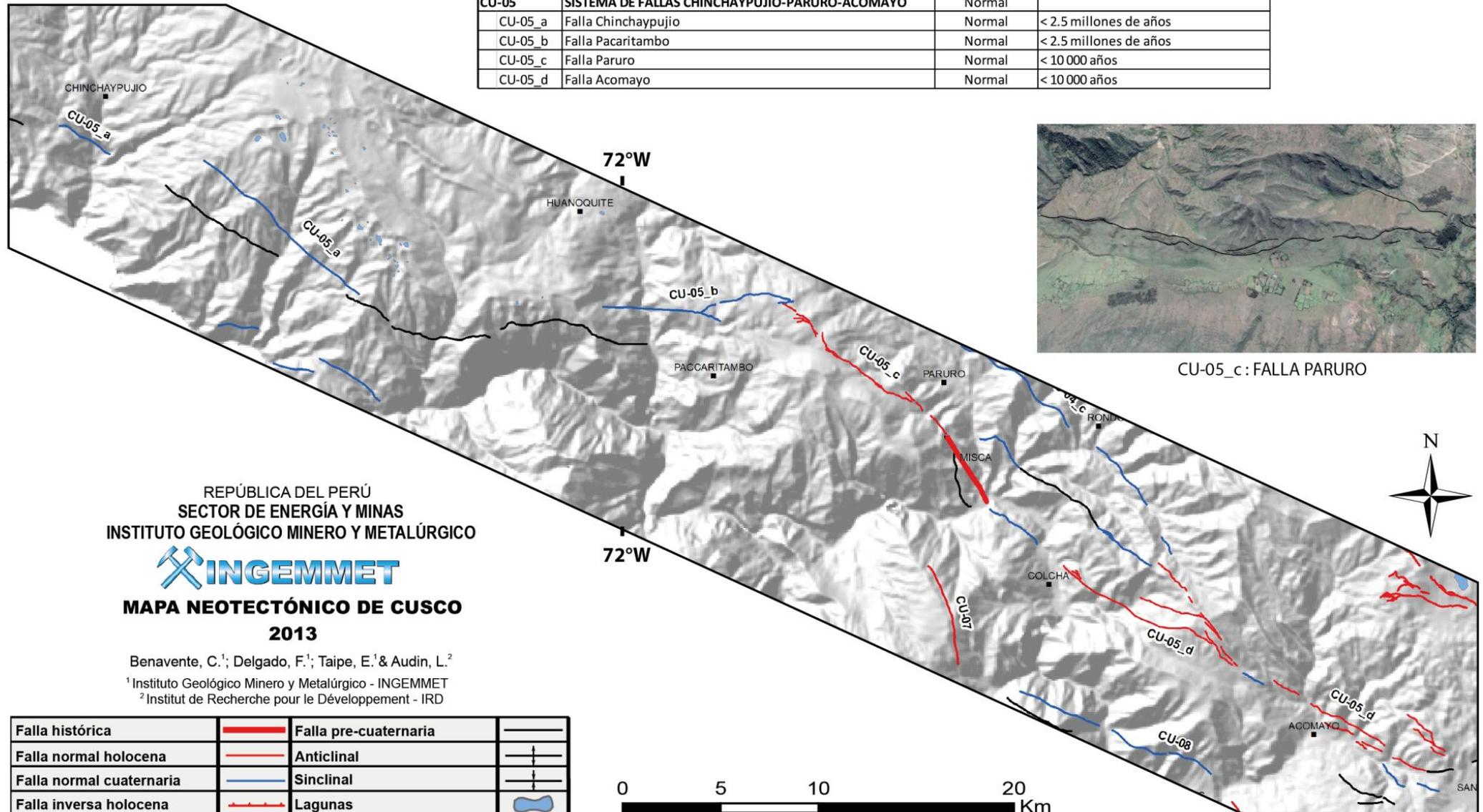


Figura 04: Sistema de Fallas Chinchaypujio-Paruro-Acomayo. La línea gruesa de color rojo muestra el segmento reactivado que generó el sismo del 27 de setiembre.



Figura 06: En líneas negras se observa los segmentos de la Falla Paruro localizada al sur de Paruro (Parte central).



Foto 1: Vista panorámica de un segmento de la Falla Paruro en donde se pueden observar el desnivel generado en la superficie producto de la actividad tectónica. La traza pone en contacto areniscas y lutitas de coloración rojiza con depósitos aluviales y coluviales de edad cuaternaria.

Al este de los cerros Yotocjasa y Condorsenca se observa que los depósitos aluviales recientes se encuentran desplazados con movimientos de tipo normal y con saltos de hasta 1 metro, estos movimientos están asociados a la actividad tectónica cuaternaria de la falla. La traza de falla en este sector es rectilínea.

Finalmente, la proyección norte de la falla muestra en los sectores de Patacancha y Pampa Huaylla una distribución en tipo echelón, donde el trazo principal presenta una dirección N150°E y los secundarios direcciones aproximadamente este-oeste,

generándose así una deflexión en la estructura. Los escarpes secundarios, se encuentran morfológicamente bien conservados y originaron desniveles en la superficie que varían entre 0.7 y 1 metro (Figura 5). Por consiguiente, se propone que estas rupturas superficiales de hasta 1 metro se encuentran relacionadas con la actividad más reciente de la estructura, rupturas que se dieron con movimientos de tipo normal con componente de rumbo sinextral según el análisis microtectónico realizado.

Cabrera (1988), reporta en base a registros históricos que poblados como Paruro, Yaurisque, Rondocan, entre otros, fueron afectados grandemente o destruidos en su totalidad por sismos. Los catálogos sísmicos del IGP y de la USGS reportan sismos superficiales en los últimos años, por ejemplo el año 2003 dos eventos de 4.8 y 5 grados de magnitud (MI) en el mes de agosto y el año 2006 un sismo de 4.3 de magnitud (MI) en el mes de setiembre.

Hacia el sureste de la falla Paruro, esta se segmenta en tres segmentos, siendo el segmento entre Misca y Cusibamba el que se reactivó el 27 de setiembre (Figura 07).

El segmento Misca-Cusibamba se encuentra al sureste de la Falla Paruro, tiene una dirección N150°, el segmento reactivado tiene una longitud de 3.7 Km y va desde el cerro Puca Runto al puente Cusibamba en el río Apurímac, este segmento cruza los poblados de Misca y Cusibamba, los cuales fueron los más afectados, ocasionando pérdida de infraestructura y pérdida de vidas humanas.

Los estudios detallados de las fallas, permitieron generar mapas de amenaza sísmica para movimientos en masa y procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos. Estos mapas, se calcularon a partir de las interacciones entre los mapas de susceptibilidad (a movimientos en masa y a procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos) y los mapas de iso-aceleraciones sísmicas deducidos de la magnitud máxima posible que una falla activa pueden generar para posteriormente elaborar los mapas de peligrosidad de movimientos en masa y procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos detonados por sismos; estos análisis se efectuaron para las fallas activas en la región Cusco, dentro de ellas se tomó como escenario la falla Paruro, determinando el grado de peligrosidad alta, media y baja. En el Anexo 1 presentamos el mapa de Amenaza por movimientos en masa de la falla Paruro.

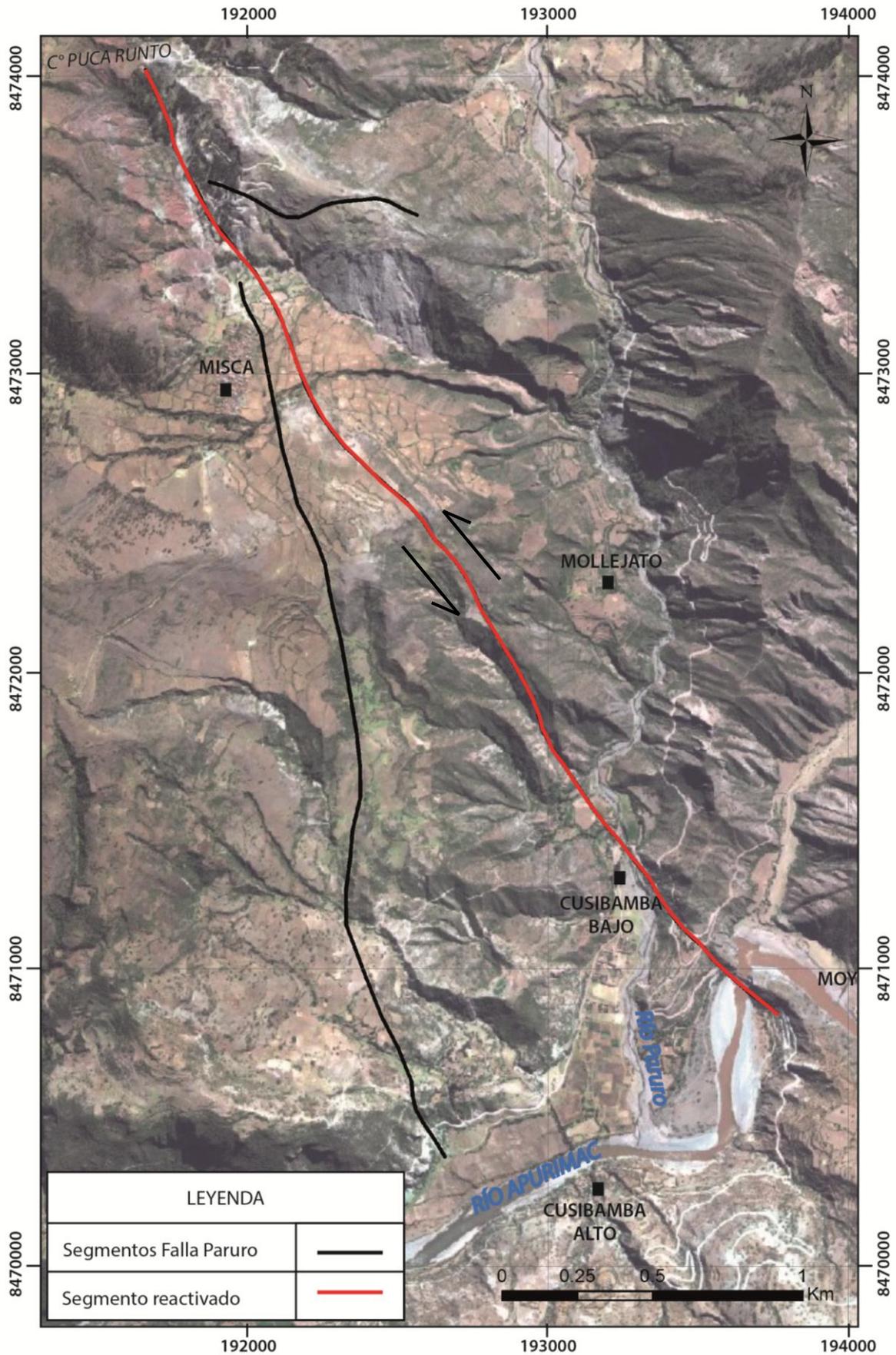


Figura 07: En línea roja se observa el segmento reactivado de la falla Paruro que origino el sismo del 27 de setiembre de 2014 (Segmento Misca y Cusibamba).

6.0 EFECTOS COSÍSMICOS

Los terremotos pueden producir, además del movimiento vibratorio característico, una serie de efectos inducidos (efectos cosísmicos), que dan lugar a grandes deformaciones y roturas del terreno, como son los fenómenos de movimientos en masa y los fenómenos de licuefacción de suelos (Ver figura 08).

Estos efectos son los que muestran las deformaciones simultáneas a la ocurrencia del terremoto, y pueden estar asociadas, tanto a efectos geológicos, producidos por procesos y estructuras geológicas (ruptura superficial de una falla), como a los daños producidos directamente en la fábrica de las construcciones (Figuras 09 y 10).

6.1. Efectos Geológicos

Los efectos geológicos son los efectos del terremoto que se pueden observar. La metodología de análisis aplicables a estos efectos, son las técnicas clásicas de geología, ya que se tienen análisis pre y post sismo.

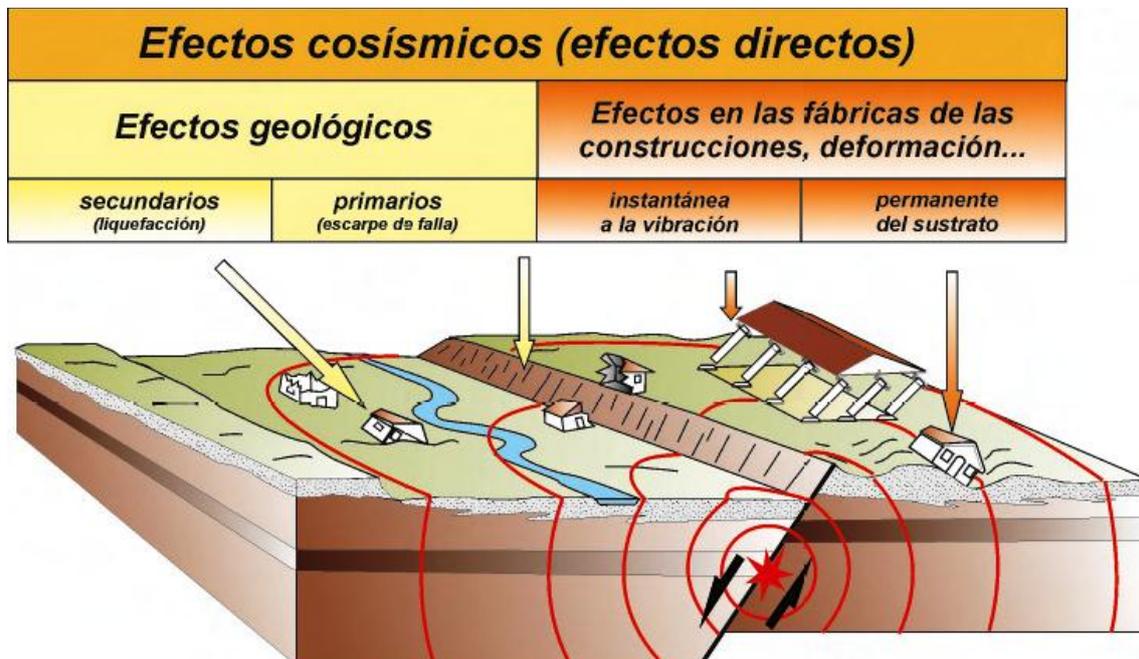


Figura 09: Diagrama de distribución de efectos cosísmicos (efectos directos) de terremotos en yacimientos arqueológicos (Rodríguez-Pascua et al., 2011).

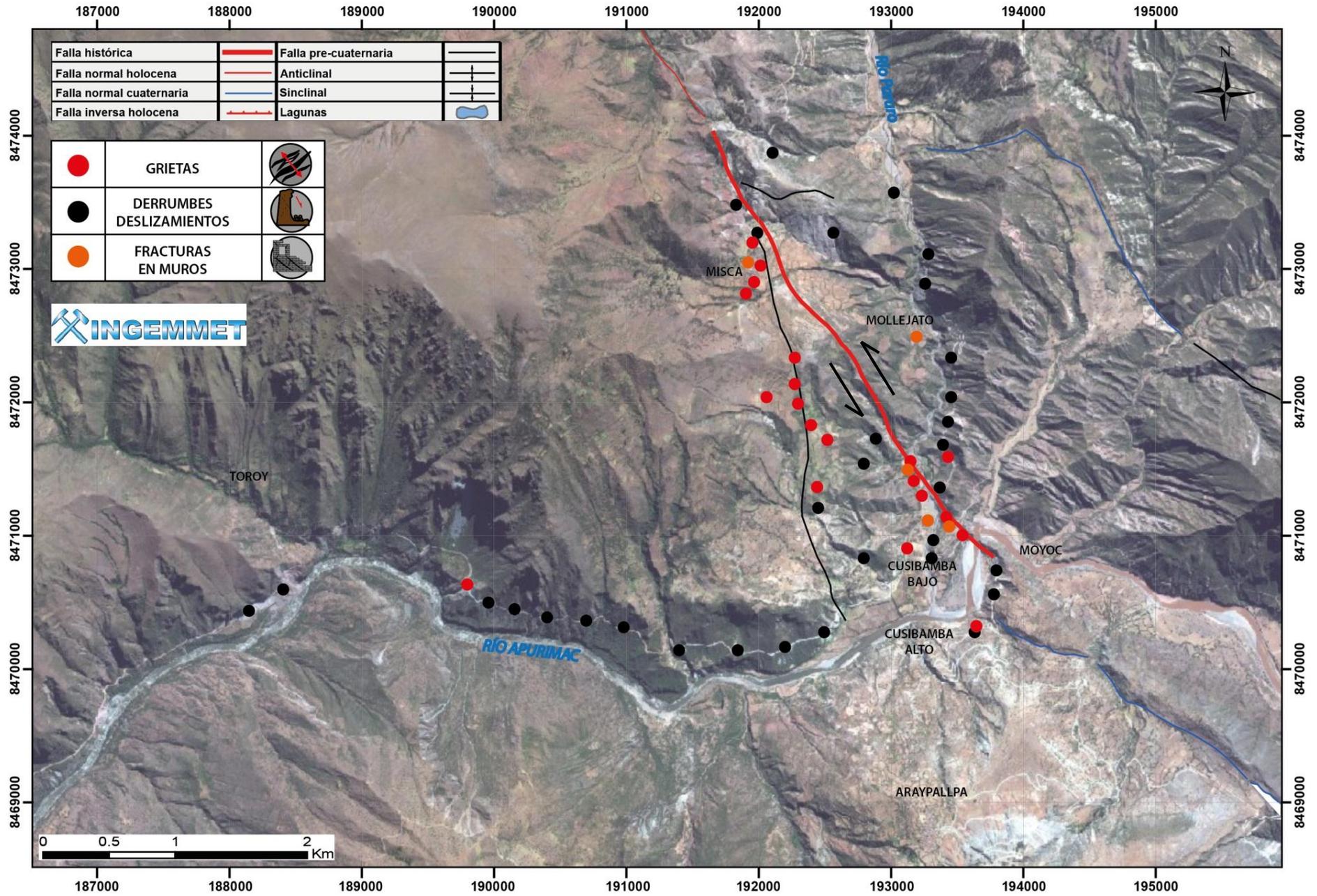


Figura 08: Mapa de inventario de eventos cosísmicos producidos por el sismo del 27 de setiembre de 2014.

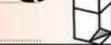
EFFECTOS ARQUEOLÓGICOS DE TERREMOTOS (EAE)	I. EFECTOS COSÍSMICOS PRIMARIOS (EFECTOS DIRECTOS)	EFFECTOS GEOLÓGICOS	Efectos geológicos Primarios	Escarpes de falla 
			Levantamientos / hundimientos 	
			Efectos geológicos Secundarios	Licuefacciones y diques de arena 
				Deslizamientos 
				Caída de bloques 
				Tsunamis / Seiches 
		Colapsos en cavidades 		
		EFFECTOS EN LA FÁBRICA DE EDIFICIOS	Estructuras de deformación generadas por deformación del sustrato	Pavimentos de argamasa plegados 
				Fracturas y pliegues en enlosados regulares 
				Fracturas y pliegues en enlosados irregulares 
Impactos entre el enlosado 				
Contrafuertes desplazados y girados 				
Muros basculados 				
Muros desplazados 				
Muros plegados 				
Estructuras de deformación generadas en la fábrica del edificio	Fracturas penetrativas en bloques de sillería 			
	Fracturas conjugadas en muros de estuco o ladrillo 			
	Columnas caídas y orientadas 			
	Giros en bloques de sillería y columnas 			
	Bloques de sillares desplazados 			
	Claves de arco desplazadas 			
	Escalones y líneas de bordillo plegadas 			
	Muros colapsados (incluyendo restos humanos y objetos de valor bajo los escombros) 			
	Bóvedas colapsadas 			
	Marcas de impacto 			
Cerámica aplastada 				
Esquinas fracturadas 				
II. EFECTOS 2º POSTSÍSMICOS (EFECTOS INDIRECTOS)		Incendios		
		Reparación de construcciones		
		Elementos de reciclado anómalos		
		Abandonos injustificados		
		Falta de registro estratigráfico en la secuencia arqueológica		
		Avenida súbita por roturas de presas artificiales embalsamientos naturales		
		Construcciones antisísmicas		

Figura 10: Tabla de clasificación de los Efectos Arqueológicos de Terremotos (Earthquake Archaeological Effects: EAE).

Los fenómenos que se pudieron observar en campo fueron los siguientes:

DESLIZAMIENTOS: En la zona evaluada la mayoría de los deslizamientos observados son superficiales y traslacionales, estos se observan principalmente en los cortes de carretera (Figura 08). Ver Fotos 2, 3, 4



Foto 2: Deslizamiento en la carretera Paruro – Accha, margen derecha del río Apurímac.



Foto 3: Deslizamientos traslacionales en areniscas. Tramo Misca – Cusibamba, margen izquierda del río Paruro.



Foto 4: Cabecera del deslizamiento – flujo, se ubica a la entrada del poblado de Misca.

CAÍDA DE ROCAS – DERRUMBES: Este se da por varios detonantes, uno de ellos son los sismos. En la zona evaluada se observan caídas de roca y derrumbes en la localidad de Miscas y otros que afectan la carretera Paruro – Accha, también se observan derrumbes en la carretera Cusibamba – Tincoc (Figura 08). Fotos 5 y 6.



Foto 5: Caída de derrubios en el tramo de la carretera Paruro - Miscas



Foto 6: Caída de rocas en tramos de la carretera Cusibamba-Tincoc.

FRACTURAS Y GRIETAS: Producto de la liberación de energía y a la respuesta de las ondas sísmicas a los materiales (suelo o roca). En la zona evaluada, estas afectan vías de comunicación carretera y terrenos de cultivo (Figura 11). Así tenemos agrietamientos en terrenos de cultivo y carretera Paruro – Accha y Cusibamba – Tincoc; así como en caminos vecinales (fotos 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13). La dirección preferente de las grietas son N110° N120° y llegan a tener aberturas de hasta 30cm, profundidades de 120cm; la mayoría de estas grietas son paralelas al segmento reactivado de la falla Paruro.



Foto 7: Grieta en el poblado de Misca afectando el camino, un muro y una vivienda, presenta una dirección N65° y una abertura máxima de 10cm.

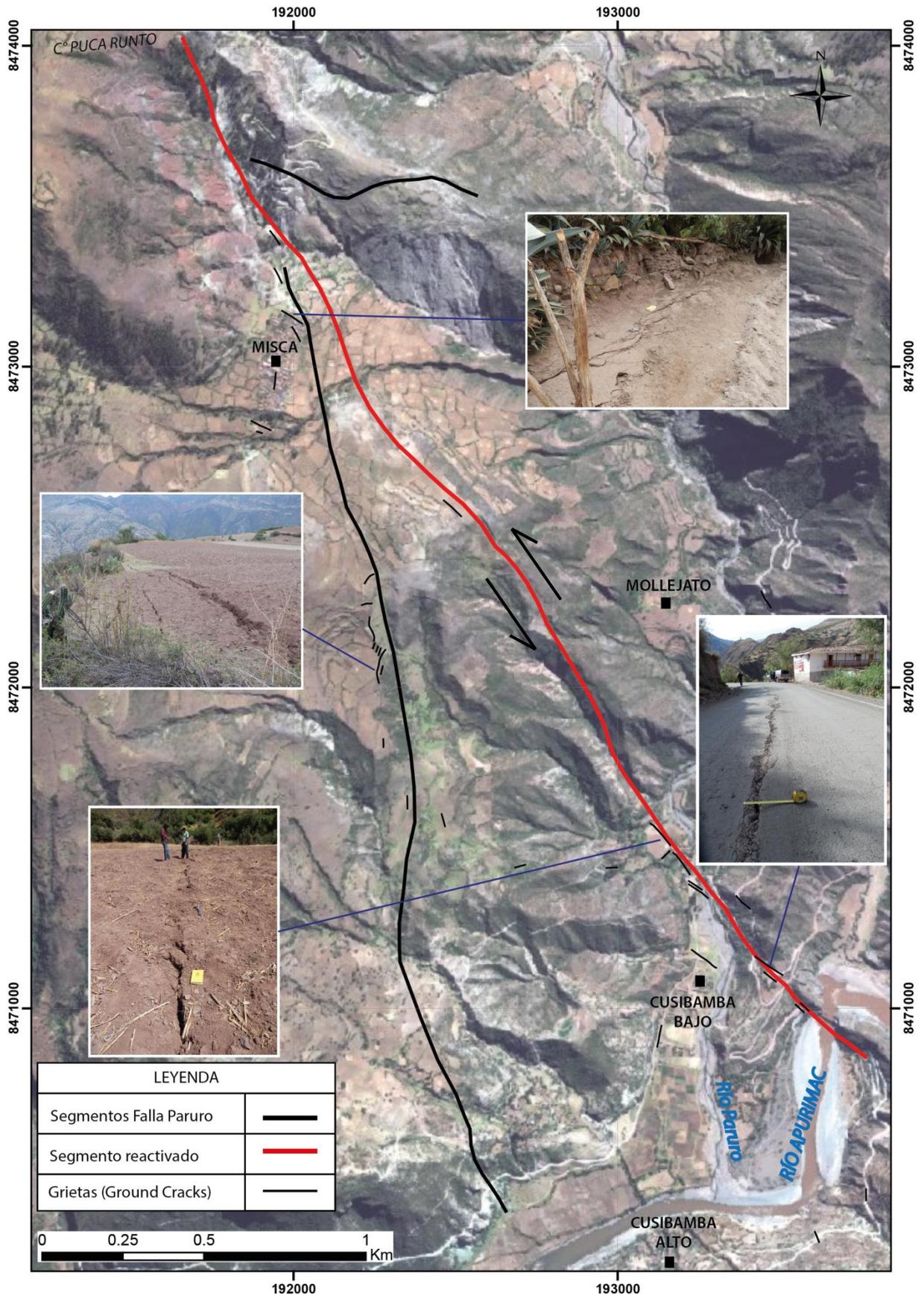


Figura 11: Mapa de ubicación y orientación de las grietas en el terreno.



Foto 8: Grieta en el poblado de Misca, tiene una longitud de 15m con dirección preferente N110°, la abertura máxima es de 7 cm, se observa un tipo de movimiento sinistral.



Foto 9: Grieta en terreno de cultivo, tiene una longitud de 25m, la abertura máxima es de 35 cm, un desnivel de 20 cm; el tipo de movimiento que presenta es sinistral.

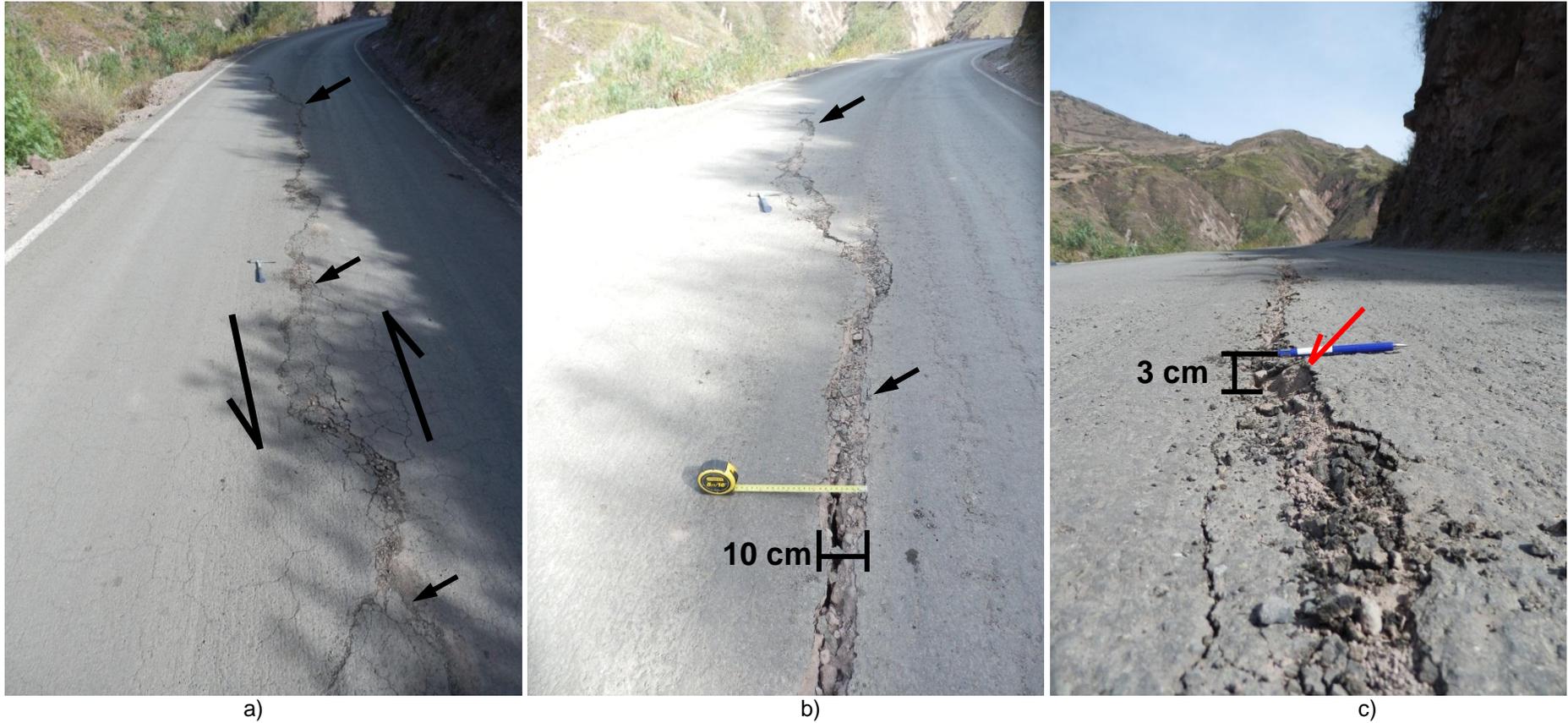


Foto 10: Grieta en la carretera Paruro-Accha, tiene una longitud de 45 m, en a) se muestra el tipo de movimiento y la dirección N152°, b) la abertura máxima es de 10 cm, c) se observa un desnivel de 2.5-3cm, la dirección de movimiento N55°.



Foto 11: Grieta en el poblado Cusibamba Bajo, tiene una longitud de 25m y afecta la carretera, la dirección principal es N112° y su abertura máxima con 10cm, se observa como las grietas estas en dirección de una vivienda destruida



Foto 12: Grieta en el poblado Cusibamba Bajo, tiene una longitud de 100 m, su dirección es N126°, una abertura máxima de 20cm y una profundidad de 120cm. viene afectando terrenos de cultivo y la prolongación de esta grieta está alineada a las viviendas destruidas en esta localidad.

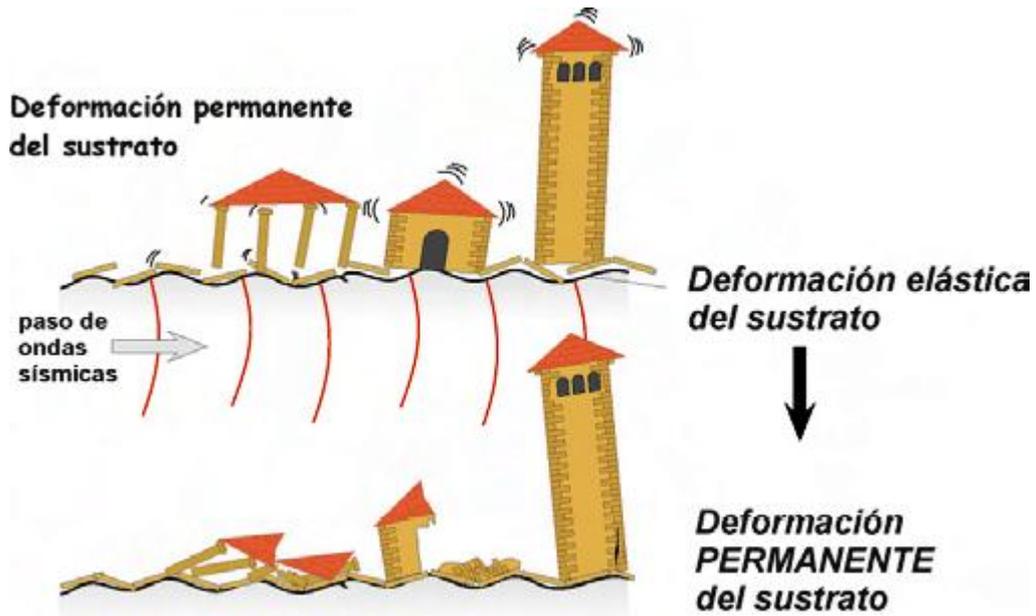


Foto 13: Grieta en la carretera Paruro – Accha, margen izquierda del río Apurímac, presenta una dirección N85°, una abertura máxima de 10cm y presenta un desnivel de 6cm hacia el norte. Se observa que la prolongación de la grieta termina en un deslizamiento.

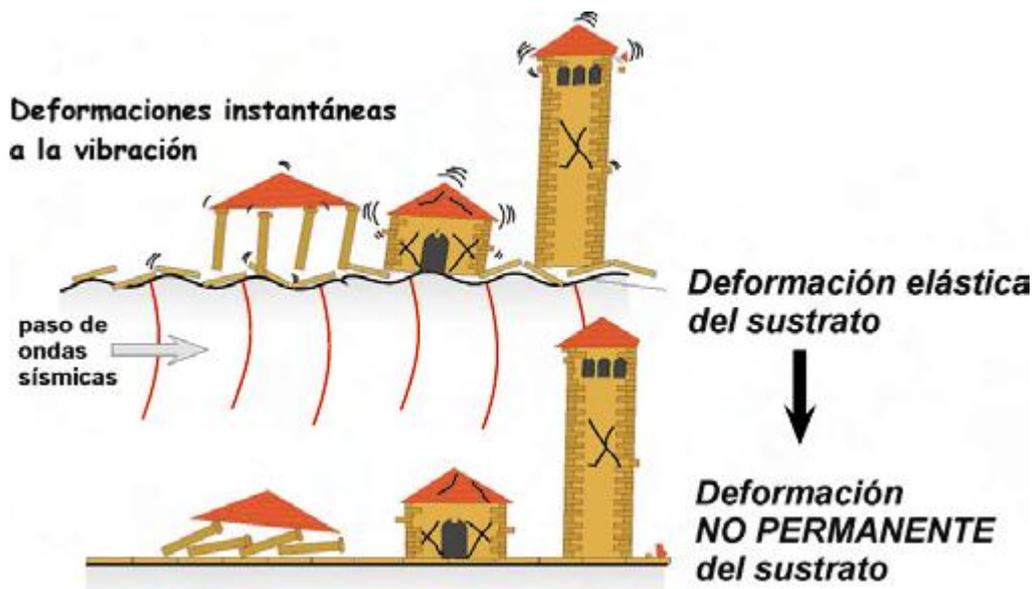
6.2. Efectos en la fábrica de las construcciones

Estos efectos están representados por los daños directos a las edificaciones e infraestructuras.

Esta clasificación establece dos grupos de efectos en la fábrica de las edificaciones: (a) los daños producidos por la deformación permanente del sustrato, y (b) deformaciones instantáneas a la vibración (Figura 10). Hay que tener en cuenta que esta clasificación no implica que ambos tipos de efectos no puedan aparecer simultáneamente en un lugar afectado por terremotos; es una clasificación genética teniendo en cuenta el momento de la deformación: instantáneo a las vibraciones, o como consecuencia de la deformación del sustrato en el que se encuentran las estructuras (viviendas, etc) (Figura 12).



a)



b)

Figura 12: Momento de deformación de infraestructura y sustrato. a) se observa el paso de las ondas sísmicas, afecta las edificaciones debido a la deformación elástica del sustrato (suelo), pero debido al tipo de suelo este puede quedar deformado permanentemente, pueden observarse en el terreno vasculamientos, plegamientos, fracturas y grietas. b) se observa el paso de las ondas sísmicas, afecta las edificaciones debido a la deformación elástica del sustrato (suelo), pero debido al tipo de suelo este no sufre ninguna deformación permanentemente, solo se puede observar en las edificaciones debido a la dirección de agrietamientos y/o deformaciones en la dirección de las ondas sísmicas. (Tomado de Giner-Robles et al., 2011)

Los muros que presentan poco o ningún desplazamiento, fueron analizadas partiendo del patrón de fracturación observable en el muro.

En muchas ocasiones este tipo de estructuras (fracturas en los muros) se producen por deformaciones permanentes del terreno (Figura 13) Por ello, en el caso de observar patrones de fracturación inducidos por deformación permanente del terreno, es necesario analizar esas deformaciones del terreno con metodologías clásicas de análisis estructural geológico para poder obtener información sobre el tensor de deformación. Estas expresiones de deformación se pudieron observar en los poblados de Misca y Cusibamba Bajo (Foto 14).

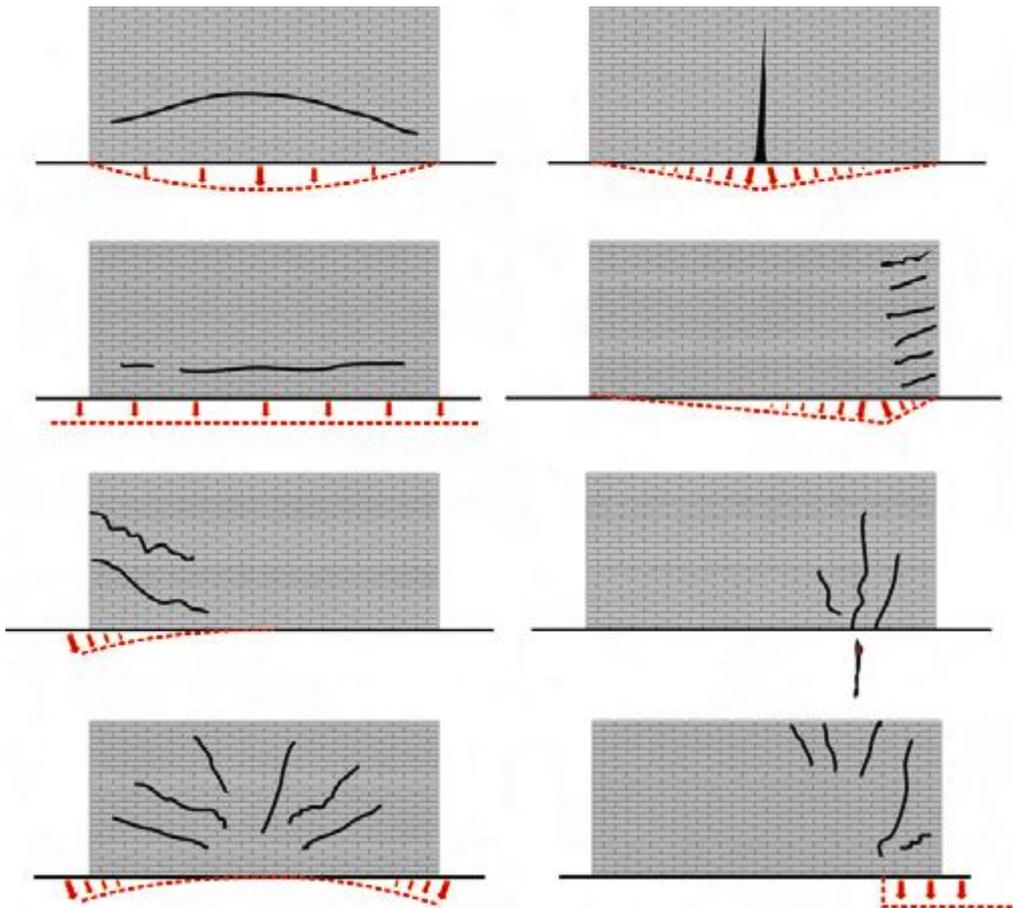


Figura 13: Diferentes patrones de fracturación en un muro por deformación permanente del terreno. La distribución y simetría de las fracturas se puede asociar a una geometría en la deformación del terreno. Estas deformaciones permanentes en el terreno pueden deberse a diferentes procesos, entre ellos la sismicidad. No obstante, es bastante complejo poder establecer el origen de las deformaciones en el sustrato sin realizar un análisis conjunto con otro tipo de deformaciones (análisis de grietas cosísmicas en el terreno). Como la respuesta de los muros depende directamente de la deformación del terreno, lo más adecuado es analizar la deformación del terreno (Flechas rojas). (Modificado de Arcos y Portu, 2003).



Foto 14: Vista del Salón Comunal de Misca. Se aprecia el buen estado de las paredes y tejado; pero con una observación: En el cuadro rojo se aprecia el agrietamiento y basculamiento del muro, por efecto de deformación en el terreno (Figura 12).

Existe otro tipo de fracturas en estructuras murarias que se producen como respuesta frágil a las deformaciones elásticas del sustrato, pero en este caso sin necesidad de que se produzcan deformaciones permanentes del mismo. Este tipo de fracturación correspondería a los efectos de terremoto enmarcados dentro de las deformaciones instantáneas a la vibración: fracturas penetrativas y fracturas conjugadas (ver figura 09).

Las fracturas más comunes asociadas a terremotos en estructuras murarias, son las fracturas conjugadas que normalmente dibujan un esquema muy característico en forma de cruz o aspa (Figura 14 y 15). Este tipo de estructuras se produce por movimientos de cizalla cíclicos paralelos al plano de muro, estos nos pueden dar la orientación del paso de las ondas sísmicas. Estas fracturas se observan en las viviendas como también en la Iglesia del poblado de Misca.

Luego de todo el análisis de las fracturas y, con los diferentes indicios en el terreno (grietas cosísmicas, derrumbes, caída de rocas, etc) y en los muros o infraestructura se puede determinar el tipo de movimiento y la dirección de propagación de las ondas (Figura 16), también se hizo el análisis para algunos sectores, como en el poblado de Misca (Figura 17)

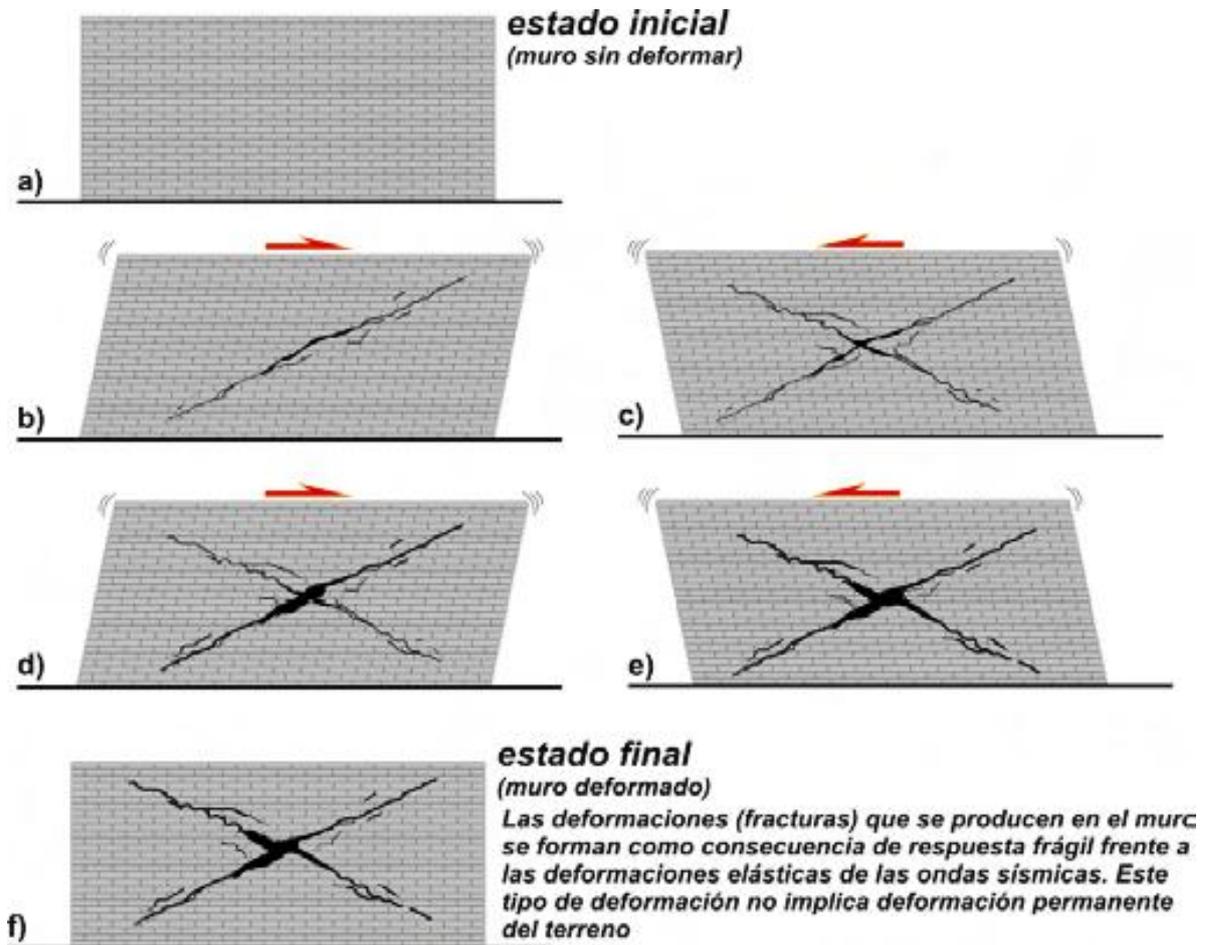


Figura 14: Fracturas conjugadas. Fracturación de un muro por movimientos sísmicos de carácter cíclico y paralelos al mismo. Suelen aparecer con mucha frecuencia en muros de ladrillo. Se producen fisuras en cada uno de los ciclos, provocando fracturas conjugadas (en forma de cruz o aspa) que suelen aparecer con un ángulo de 45°. Este tipo de deformaciones son producidas por las ondas sísmicas y no implican la deformación permanente del terreno; son el resultado del comportamiento frágil del muro frente a las deformaciones elásticas inducidas por las ondas sísmicas. (Tomado de Giner-Robles et al., 2011)

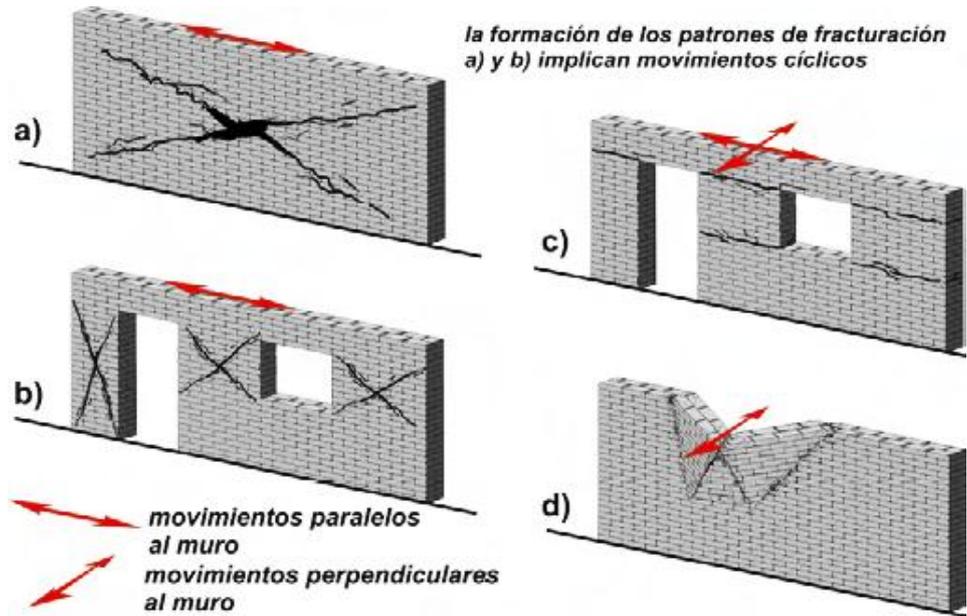


Figura 15: Patrones de fracturación de un muro inducidos por cargas horizontales. Los dos primeros (a y b) se forman por movimientos cíclicos paralelos a la traza del muro (fracturas conjugadas) (ver figura 7.24). Los patrones de fracturación del caso (d) se forman por movimientos perpendiculares al muro. En el caso del patrón de fisuración (c) puede estar producido tanto por movimientos perpendiculares como paralelos al muro. No obstante, en terremotos instrumentales este último tipo de fracturación suele indicar un movimiento perpendicular a la estructura muraria. (Tomado de Giner-Robles et al., 2011)

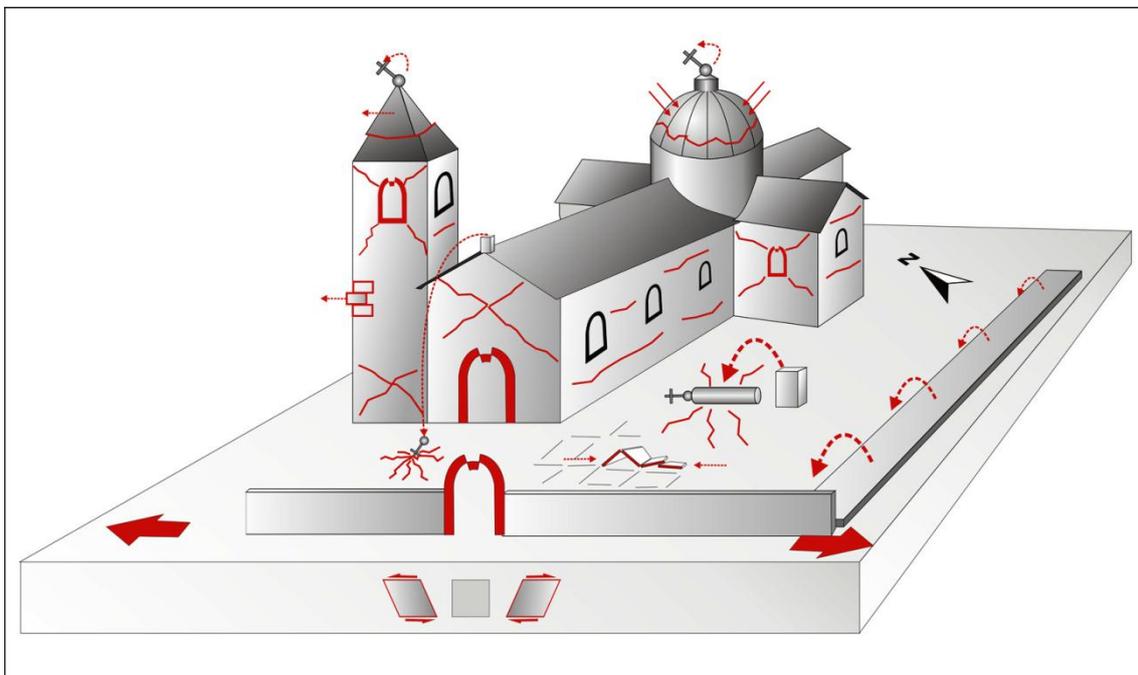
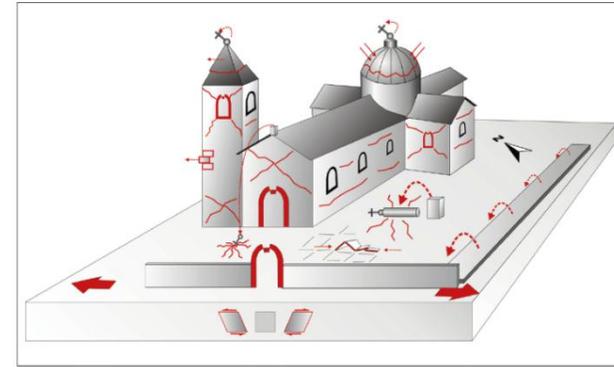
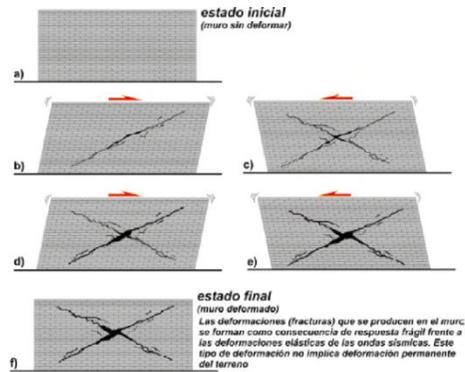


Figura 16: Construcción idealizada con los Efectos Arquitectónicos de Terremotos (EAEs) teóricos que generaría un movimiento sísmico con un desplazamiento del sustrato en dirección NO-SE (tomado de Rodríguez-Pascua et al., 2013)



a)



b)



c)



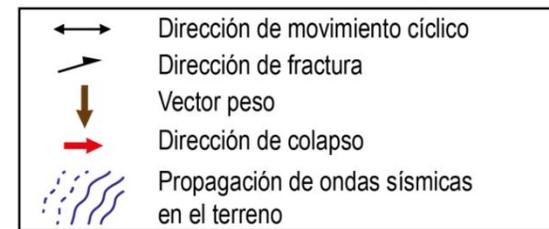
d)



e)



f)



Evaluación de fracturas en muros por efecto de ondas sísmicas. En las figuras a, b, c, d, e se observa todo el análisis de las fracturas generadas por el sismo, el análisis detallado nos da la posible dirección de propagación de las ondas sísmicas. La figura f es un mapa elaborado con el análisis hecho en muros y/o edificaciones y grietas en el terreno.

Figura 17: Evaluación de fracturas y grietas, poblado de Misca.

7.0 LOCALIDADES AFECTADAS

Para una mejor descripción de los daños se, se realizó comunidad por comunidad afectada

7.1. LOCALIDAD DE MISCA

La localidad de Misca es uno de los poblados afectados por el sismo del 27 de setiembre, debido a que el segmento reactivado se encuentra muy cercano al pueblo (Ver Figura 07). El poblado se emplazado sobre depósitos coluviales, en la figura 18 se observa el cartografiado de movimientos en masa que se encuentran alrededor de la comunidad de Misca.

La evaluación ingeniero – geológica de la comunidad de Misca presentado en el Cuadro 1 muestra una descripción general del lugar.

Los daños ocasionados por la reactivación del segmento Misca - Cusibamba (Falla Paruro) fueron: viviendas colapsadas, deslizamiento, derrumbes, caídas de rocas y agrietamientos en el terreno (Fotos 15 y 16), determinados por la relación amplificación de onda, tipo de suelo y tipo de construcción.

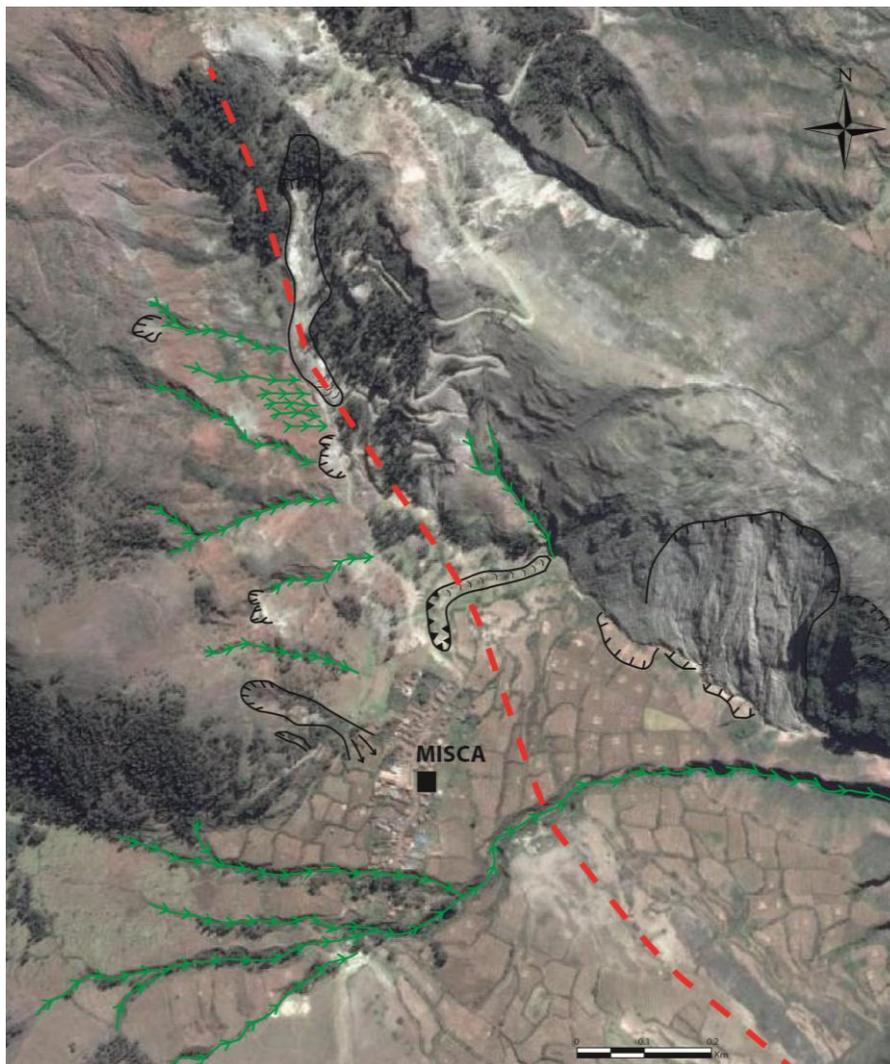


Figura 18: Inventario de movimientos en masa que se encuentran en el poblado de Misca, donde se observa en líneas punteadas rojas el trazo del segmento reactivado, cárcavas, deslizamientos y derrumbes.

EVENTO: SISMO DEL 27 DE SETIEMBRE DE 2014 – PARURO, CUSCO

CUADRO 1
EVALUACIÓN INGENIERO GEOLÓGICA DE LA COMUNIDAD DE MISCA
 Distrito de Paruro, provincia Paruro

PARÁMETROS	RECONSTRUCCIÓN	REUBICACIÓN TEMPORAL (Poblado de Misca)
EFECTOS DE SITIO		
Entorno Geológico	Misca se localiza cerca al trazo de una falla geológica (reactivada por sectores – falla activa)	Planicie estructural correspondiente a la formación Paruro.
Sustrato	Lutitas rojas y areniscas	Lutitas rojas y areniscas
Tipo de depósito	Cono deluvial	
Peligro Geológico	Sismo, producido por la reactivación del segmento Misca-Cusibamba (segmento activado de la falla Paruro, Sistema de fallas Chinchaypujio-Paruro-Acomayo) El 2008 se produjo, por intensas precipitaciones, fue afectado terrenos de cultivo, viviendas y el templo del pueblo.	Sismos, debido a la cercanía de fallas activas Estable a movimientos en masa. Se recomienda no reubicar en los bordes de la planicie.
Pendiente del terreno	10° - 15°	10° - 15°
Suelo	Arenas arcillo – limosas, gravilla (20%), medianamente consolidadas, plásticas	Arenas arcillo – limosas, gravilla (20%), medianamente consolidadas, plásticas
Presencia de agua	Presencia de filtraciones y bofedales en el terreno.	Presencia de filtraciones y bofedales en el terreno. Estos tienen que drenarse.
BALANCE DE DAÑOS (1)		
Viviendas Colapsadas	40	
Viviendas afectadas	15	
Colegio colapsado	2	
Colegio afectado		
Templo inhabitable	1	
SOCIAL	Siempre es problemático mover a las personas de su terruño	



a)



b)

Foto 15: Daños en las viviendas y templo en Misca por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción.



a)



b)

Foto 16: Viviendas destruidas en Misca, obsérvese el tamaño de los mismos (dos pisos) y su diseño estructural (sin refuerzos)

ACCIONES A TOMAR:

- Para la reconstrucción de Misca se cuenta con dos alternativas que se muestran en la figura 19. La determinación del lugar definitivo dependerá del saneamiento de los mismos.
- Las zonas recomendadas para la reubicación (Figura 19) son:
 - 1) Para la reubicación temporal, se puede tomar una parte del poblado de Misca, al sur de la iglesia de Misca (Foto 17a).
 - 2) A 400 m al sur de su actual localización, en el sector de Casapampa. Este lugar reúne mejores condiciones geológicas que el anterior (Foto 17b).
- Mientras se urbaniza el Nuevo Misca, se recomienda trasladar la población a la zona de reubicación temporal, ubicado en el poblado de Misca (Figura 19). Zona estable a movimientos en masa.
- Luego de la reubicación se recomienda la demolición total de las casas dañadas en Misca, incluyendo el templo.
- Si se toma la decisión de la opción 1, se debe de considerar el drenaje de las filtraciones y oconales localizados en el área.
- Al realizar el diseño del nuevo centro poblado de Misca se debe de considerar el drenaje para las aguas pluviales y también para las filtraciones y oconales localizados en el área.
- Debido a la alta sismicidad por fallas activas en la región Cusco se recomienda viviendas de un solo piso y con material noble. Si se trabaja con adobe, diseñar los refuerzos y/o amarres correspondientes y columnas en cantidad y ubicación suficientes para su resistencia a los sismos; se tienen ejemplos en Misca de viviendas que no sufrieron daños (Fotos 18 y 19).

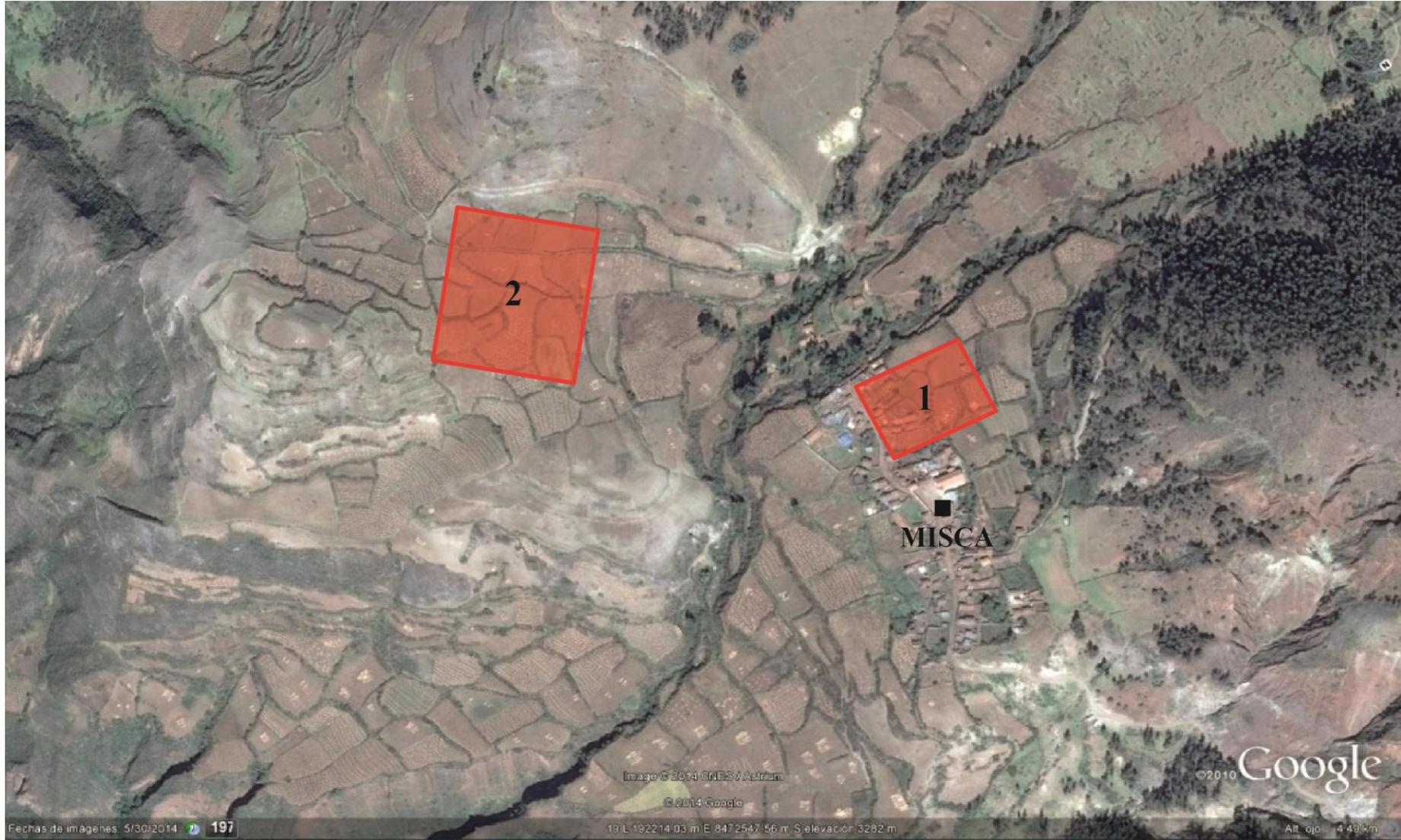


Figura 19: Zonas de reubicación para la localidad de Misca: 1) Reubicación temporal sobre poblado actual. 2) Reubicación del poblado.



a)



b)

Foto 17: a) Vista de la zona de reubicación temporal. b) Vista panorámica de la zona de reubicación (Sector Casapampa, al sur de Misca).



a)



b)

Foto 18: Viviendas de adobe en el poblado de Misca que no se destruyeron, sufrieron pocos daños fíjese los refuerzos y columnas.



a)



b)

Foto 19: Diseño de una vivienda de concreto armado que no sufrió agrietamientos, en el poblado de Misca.

7.2. LOCALIDAD DE CUSIBAMBA BAJO

La localidad de Cusibamba Bajo es el segundo centro poblado más afectado por el sismo del 27 de setiembre último, debido a que el segmento que se reactivó cruza el valle al Norte del poblado (Ver figura 07).

El poblado está emplazado en un abanico aluvial, sobre depósitos aluviales que discurrieron por la quebrada Paruro. En la figura 20 se observa el cartografiado de movimientos en masa que se encuentran alrededor de la comunidad de Cusibamba.

La evaluación ingeniero-geológica de la comunidad de Cusibamba (Cuadro 2) nos muestra una descripción del lugar y de la zona de reasentamiento.

Los daños ocasionados por la reactivación del segmento Misca-Cusibamba (Falla Paruro) fueron principalmente viviendas completamente agrietadas que son inhabitables, deslizamiento, derrumbes, caídas de rocas y agrietamientos en el terreno (Fotos 20 y 21), esto es el resultado de la relación que existe entre la amplificación de onda y el tipo de suelo más el tipo de construcción.

Estudios realizados por la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del INGEMMET, determinan que la zona de Cusibamba Bajo está considerado como Zona Crítica a los peligros geológicos por erosión fluvial y flujos de detritos provenientes de la quebrada Paruro. Ver Anexo 2.



Figura 20: Inventario de movimientos en masa que se encuentran en el poblado de Cusibamba, donde se observa que el mayor peligro por su ubicación es la erosión fluvial (flechas negras y líneas azules) y los flujos de detritos.

EVENTO: SISMO DEL 27 DE SETIEMBRE DE 2014 – PARURO, CUSCO

CUADRO 2

EVALUACIÓN INGENIERO GEOLÓGICA DE LA COMUNIDAD DE CUSIBAMBA BAJO Distrito de Paruro, provincia Paruro

PARÁMETROS	RECONSTRUCCIÓN	ZONA DE REASENTAMIENTO (a 600 m al suroeste del poblado actual)
EFFECTOS DE SITIO		
Entorno Geológico	Terraza aluvial en la margen derecha del río Paruro	Terraza aluvial en la margen derecha del río Paruro
Sustrato		
Tipo de depósito	Depósitos aluviales	Depósitos aluviales
Peligro Geológico	Erosión de riveras y flujos de detritos por la quebrada Cusibamba; así como posibles desbordes en épocas de lluvias excepcionales. Sismos por fallas activas	Posibles flujos de barro y detritos con origen en las quebradas y pequeñas cárcavas al este del centro poblado. Forestación de las laderas
Pendiente del terreno	2° - 5°	2° - 5°
Suelo	Gravas y arenas poco consolidadas, superficialmente terrenos de cultivo	Gravas y arenas poco consolidadas, superficialmente terrenos de cultivo
Presencia de agua	Nivel freático a nivel del río	Nivel freático a nivel del río
BALANCE DE DAÑOS (1)		
Viviendas Colapsadas		
Viviendas afectadas	70	
Colegio colapsado	1	
Colegio afectado		
Templo inhabitable		
SOCIAL	Siempre es problemático mover a las personas de su terruño	



a)



b)

Foto 20: En a) se muestran los daños en viviendas, y b) muestra el centro educativo de Cusibamba colapsado. Esta comunidad fue afectada por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción.



a)



b)

Foto 21: En a) derrumbe generado por el sismo, en b) se observa una grieta en el terreno generada por el movimiento sísmico.

ACCIONES A TOMAR:

- Para la reconstrucción de Cusibamba Bajo se cuenta con dos alternativas que se muestran en la figura 21. La determinación del lugar definitivo dependerá del saneamiento de los mismos.
- Las dos zonas recomendadas reúnen las condiciones de seguridad física requeridas (Foto 22).
- Luego de la reubicación se recomienda la demolición total de las casas dañadas en Cusibamba Bajo, incluyendo el colegio.
- Al realizar el diseño del nuevo centro poblado de Cusibamba se debe de considerar el drenaje para las aguas pluviales y también para las filtraciones y oconales que existieran en el área, como también se deben de hacer las obras de defensa ribereña para el río Paruro y el río Apurímac.
- Debido a la alta sismicidad por fallas activas en la región Cusco, se recomienda viviendas de un solo piso y con material noble. Si se trabaja con adobe, diseñar los refuerzos y/o amarres correspondientes y columnas en cantidad y ubicación suficientes para su resistencia a los sismos; si se harán construcciones mayores tomar en cuenta el coeficiente de sismicidad.

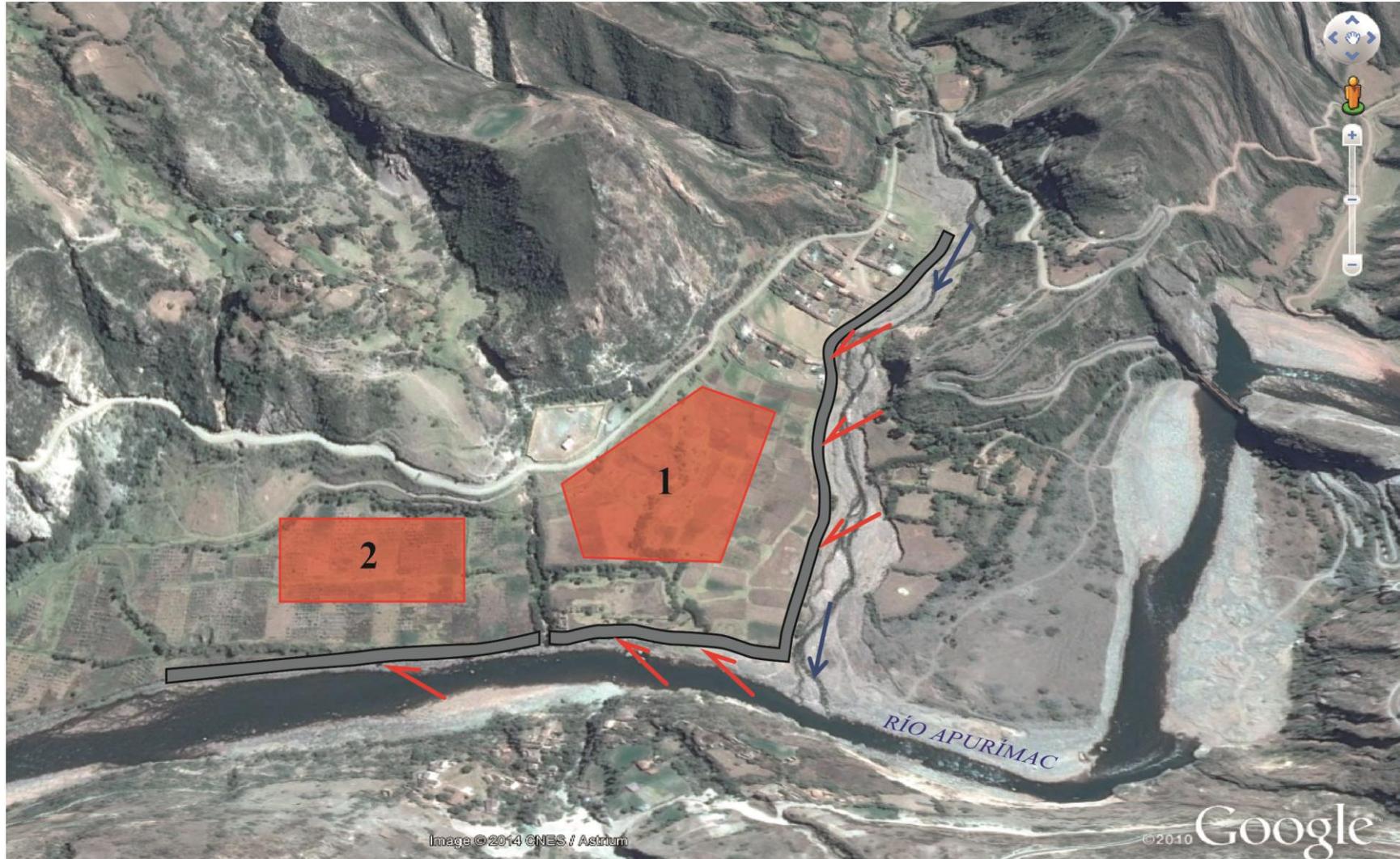


Figura 21: Posibles zonas de reubicación de Cusibamba Bajo (cuadros rojos). Teniendo en cuenta principalmente la acción erosiva de la quebrada Paruro (flecha azul). Zonas de erosión de riberas y posibles flujos de detritos con flechas rojas. Obras de defensa ribereña (cuadro plomo).



a)



b)



c)

Foto 22: a) Vista panorámica de la zona de reubicación de Cusibamba Bajo tomado de la margen izquierda del río Apurímac en rojo área de reubicación, en negro franja marginal y en verde defensa ribereña. b) Vista del lugar de reubicación. c) Vista panorámica de los terrenos de la comunidad de Cusibamba para su reubicación.

CONCLUSIONES

1. El sismo de setiembre último tuvo como escenario la zona de influencia del sistema de fallas Chinchaypujio – Paruro – Acomayo, sistema que se desarrolla en una longitud aproximada de 75 kilómetros cruzando los valles andinos al SO de la ciudad del Cusco. Por sus características morfológicas, geométricas y cinemáticas determinamos que esta estructura geológica **es activa**. Asimismo el sismo registrado el 27 de setiembre del presente es una reconfirmación de su actividad.
2. Las observaciones de campo y cartografiado post sismo indican que se reactivó un segmento de la falla Paruro (segmento Misca - Cusibamba) que forma parte del Sistema de la fallas Chinchaypujio – Paruro - Acomayo. No hay ruptura superficial pero las grietas cosísmicas identificadas en el terreno están bien alineadas y localizadas a lo largo de la falla.
3. Los estudios detallados de las fallas, en el Estudio Neotectónico de la región Cusco, realizado por INGEMMET (Boletín N°55 Serie C), permitieron generar mapas de amenaza sísmica para movimientos en masa y procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos. Para el último sismo se utilizó la misma metodología, logrando generar ambos mapas que sirvió para validar la metodología utilizada con lo observado en campo (Anexo I).
4. Se han localizado efectos cosísmicos (desprendimientos de rocas, derrumbes, deslizamientos, grietas en el terreno y otros) en el área evaluada, estos se presentan en la dirección y en el área de influencia del segmento reactivado. Estos afectan a vías de comunicación (carretera y caminos vecinales), terrenos de cultivo y algunas viviendas.
5. La localidad de Misca ha sido el centro poblado más afectado por el sismo de setiembre último; así como también Cusibamba Bajo, debido a que el segmento reactivado cruza ambas localidades.
6. La zona de Cusibamba Bajo es considerado Zona Crítica a los peligros geológicos por erosión fluvial y flujos de detritos provenientes de la quebrada Paruro.
7. En ambas localidades los daños en las viviendas se deben principalmente al tipo de construcción de las mismas. Viviendas en infraestructura, construidas con material noble y/o siguiendo normas de construcción ya establecidas no han sufrido daños significativos.

Nota:

Se denomina **falla geológica activa** a la estructura tectónica (falla geológica) que puede generar terremotos o deformaciones en la superficie. El concepto de falla geológica activa se define en función de la edad de su último desplazamiento y en estos casos corresponden a movimiento en los últimos 10 000 años.

RECOMENDACIONES

1. Para la reconstrucción de Misca se recomiendan dos alternativas que se localizan en la misma área actual. La determinación del lugar definitivo dependerá del saneamiento de los mismos. La zona de reubicación 2, localizada al sur de la actual población, (pasando la quebrada), reúne mejores condiciones geológicas.
2. En el sector de Misca, si se toma la decisión de la opción 1, se debe de considerar el drenaje para las precipitaciones pluviales ya para las filtraciones y oconales localizados en el área.
3. Mientras se urbaniza el Nuevo Misca, se recomienda realizar los trabajos para trasladar la población a la zona de reubicación temporal ubicada al sur de la iglesia de Misca, en el mismo poblado (opción 1).
4. Luego de la reubicación se recomienda la demolición total de las casas dañadas en Misca, incluyendo el templo.
5. Para la reconstrucción de Cusibamba Bajo se recomienda dos alternativas ubicadas en la misma zona. La determinación del lugar definitivo dependerá del saneamiento de los mismos.
6. Las dos zonas recomendadas reúnen las condiciones de seguridad física requeridas.
7. Luego de la reubicación se recomienda la demolición total de las casas dañadas en Cusibamba Bajo, incluyendo el colegio.
8. Para la reconstrucción de las localidades de Misca y Cusibamba Bajo, se recomienda realizar el plan urbanístico y el estudio de suelos (capacidad portante) respectivos. Realizar las obras de drenaje correspondientes si se localizan filtraciones u oconales.
9. Se recomienda viviendas de un solo piso y con material noble. Si se trabaja con adobe, diseñar los refuerzos y/o amarres correspondientes y columnas en cantidad y ubicación suficientes para su resistencia a los sismos. Se tienen ejemplos en Misca de infraestructura urbana con estas características que no han sufrido daños o fueron poco afectados.
10. En caso de reactivaciones de fallas activas, los daños en infraestructura, usualmente están restringidos a una zona, de hasta 3 km de ancho a lo largo de la zona de ruptura falla, aunque rupturas subsidiarias pueden ocurrir hasta 5 o 6 km distantes de la falla principal. Por consiguiente, para la ubicación de obras de infraestructura importante se debe considerar la localización de las fallas geológicas y cada uno de sus segmentos, así mismo debe seguirse los lineamientos establecidos en las **Normas de Seguridad Estructural de Edificaciones**.
11. Para la construcción de obras de infraestructura de mediana a gran magnitud; así como infraestructura urbana, en el área de influencia de la falla, se recomienda realizar el análisis sísmico determinístico, que relaciona los eventos sísmicos a fallas activas o potencialmente activas para representar su atenuación en el lugar. De esta manera tendremos el diseño sísmico apropiado.

12. Se recomienda un programa de monitoreo de las principales fallas activas en la región Cusco, empleando GPS diferencial. Trabajos que deberán ser coordinados con INGEMMET, siendo el Gobierno Regional un aliado importante.

Lima, 3 de noviembre de 2014.

REFERENCIAS

Arcos, H., & Portu, M. C. (2003). Movimientos sísmicos y estructuras murarias, Consorcio de compensación de seguros, Madrid 2003. 323 p.

Benavente, C.; Delgado, G.; Taibe, E.; Audin, L. & Pari, W. (2013). Neotectónica y Peligro Sísmico en la Región Cusco - Boletín N° 55, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica. INGEMMET. 245 p.

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

Carlotto, V.; Gil, W.; Cárdenas, J. & Chávez, R. (1996). Geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca, Boletín N° A65, Serie A: Carta Geológica Nacional. INGEMMET. 245 p.

Carlotto, V.; Cárdenas, J. & Carlier, G. (2011). Geología del cuadrángulo de Cusco, Boletín N° 138A, Serie A: Carta Geológica Nacional. INGEMMET. 255 p.

Giner-Robles, J.L.; Silva Barroso, P.G.; Pérez-López, R.; Rodríguez-Pascua, M.A.; Bajardí Azcárate, T.; Garduño-Monroy, V.H. y Lario Gómez, J. (2011). Evaluación del daño sísmico en edificios históricos y yacimientos arqueológicos. Aplicación al estudio del riesgo sísmico. Proyecto EDASI. Serie Investigación. Fundación MAPFRE; 96 p.

Gonzales de Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L. & Oteo, C. (2002). INGENIERÍA GEOLÓGICA. Pearson Educación, Madrid 2002. 744 p.

IGP (2014) Sismo de Paruro (Cusco) del 27 de setiembre, 2014 (5.1 ML). Informe técnico N° 03-2014. IGP. 21 p.

Macharé, J.; Benavente, C. & Audin, L. (2009). Síntesis descriptiva del mapa neotectónico 2008, Boletín N° C 40, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica. INGEMMET. 103 p.

Rodríguez-Pascua, M. A.; Pérez-López, R.; Giner-Robles, J. L.; Silva, P.G.; Garduño-Monroy, V.H. & Reicherter, K. (2011). A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) in Archaeoseismology: application to ancient remains of Roman and Mesoamerican cultures. Quaternary International. In press. QUATINT-D-10-00171R2.

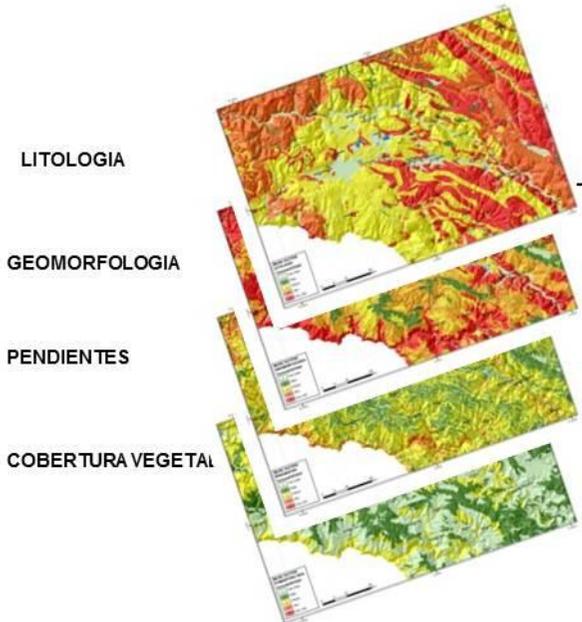
Rodríguez-Pascua, M. A.; Pérez-López, R.; Martín-Gonzales, F.; Giner-Robles, J. L. & Silva, P. G. (2013). Arqueosismología: una nueva fuente de datos sísmicos y una herramienta para la protección del patrimonio. La Ciencia y El Arte, art. 4. Pág. 53-69. 17 p.

Vilchez, M. (2013). Informe de Zonas Críticas en la región Cusco (Preliminar). Proyecto GA-44.

ANEXO 1
MAPAS DE PELIGROSIDAD
SISMO 27/09/2014

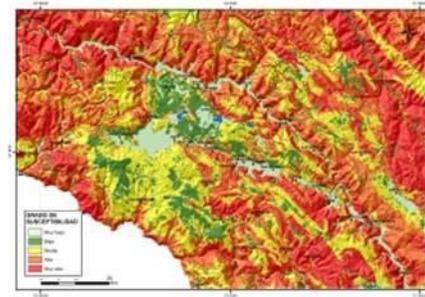
MAPAS FACTORES

SUPERPOSICIÓN DE MAPAS TEMÁTICOS DE FACTORES CONDICIONANTES



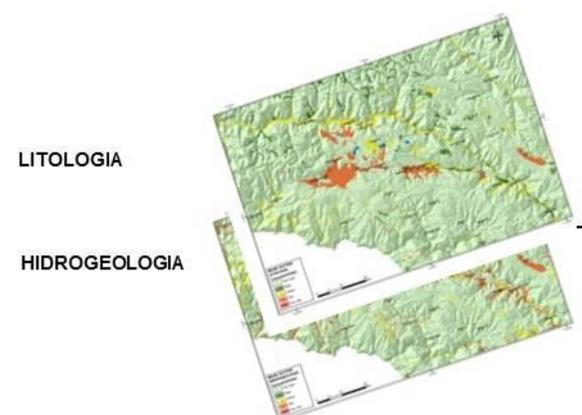
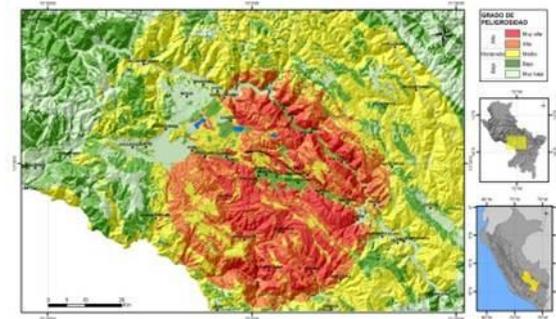
MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD

MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA

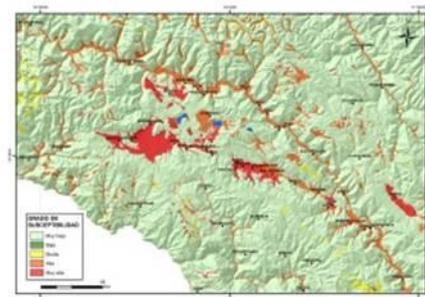


MAPAS DE AMENAZAS

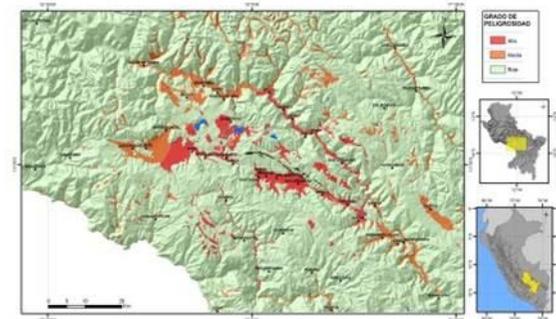
MAPA DE PELIGROS A MOVIMIENTOS EN MASA



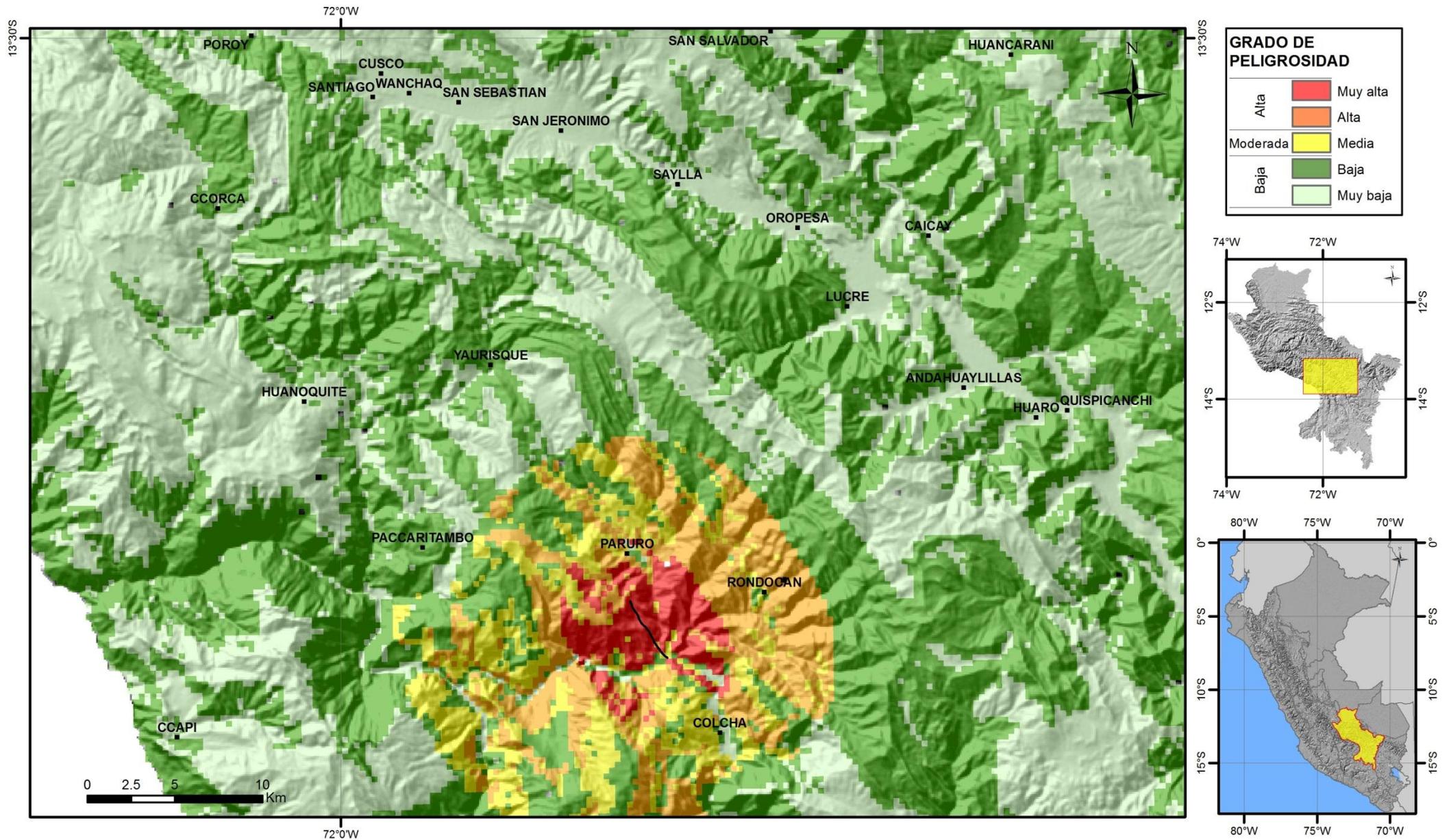
MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LICUEFACCIÓN Y/O ASENTAMIENTOS



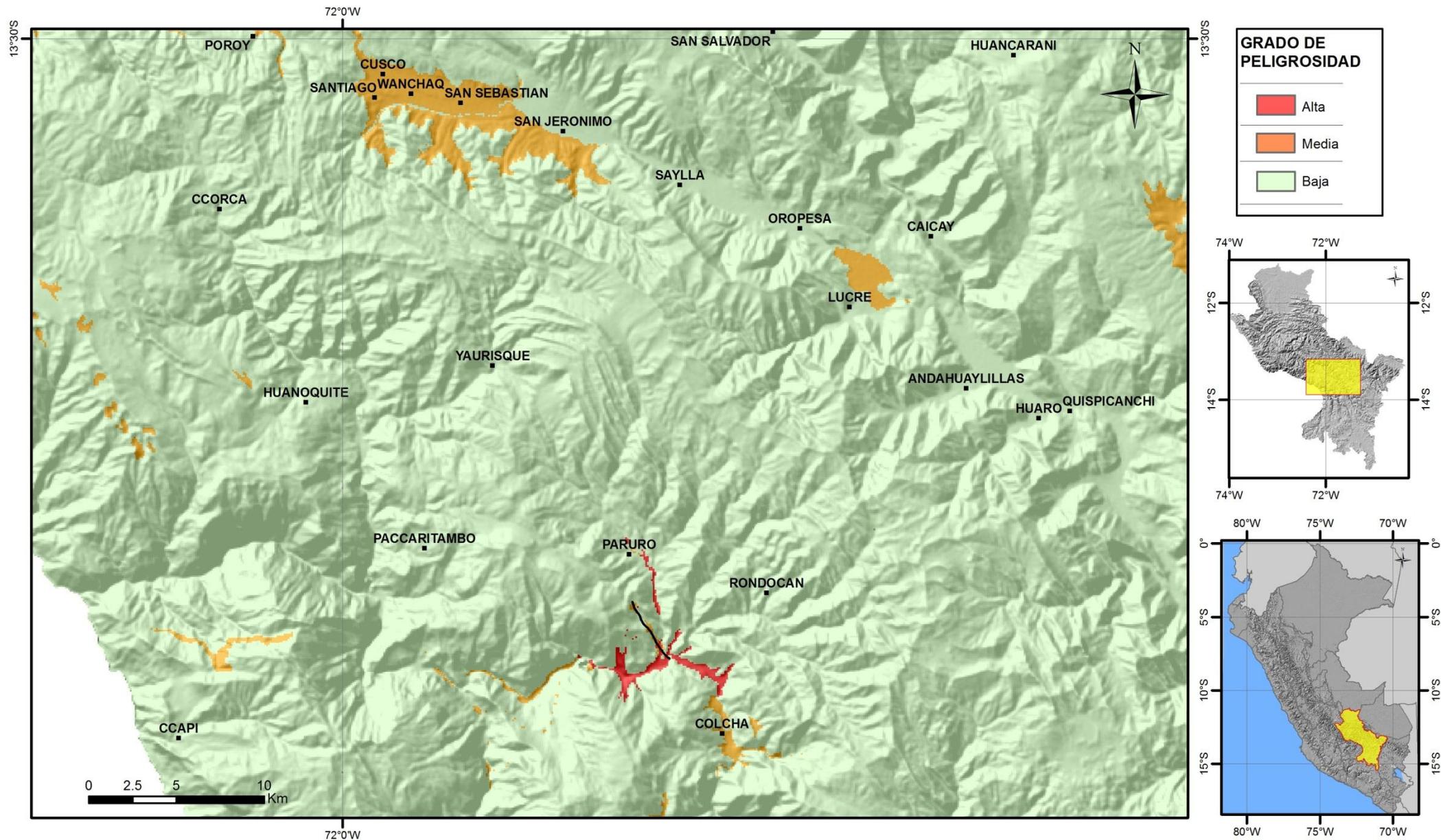
MAPA DE PELIGROS A LICUEFACCIÓN Y/O ASENTAMIENTOS



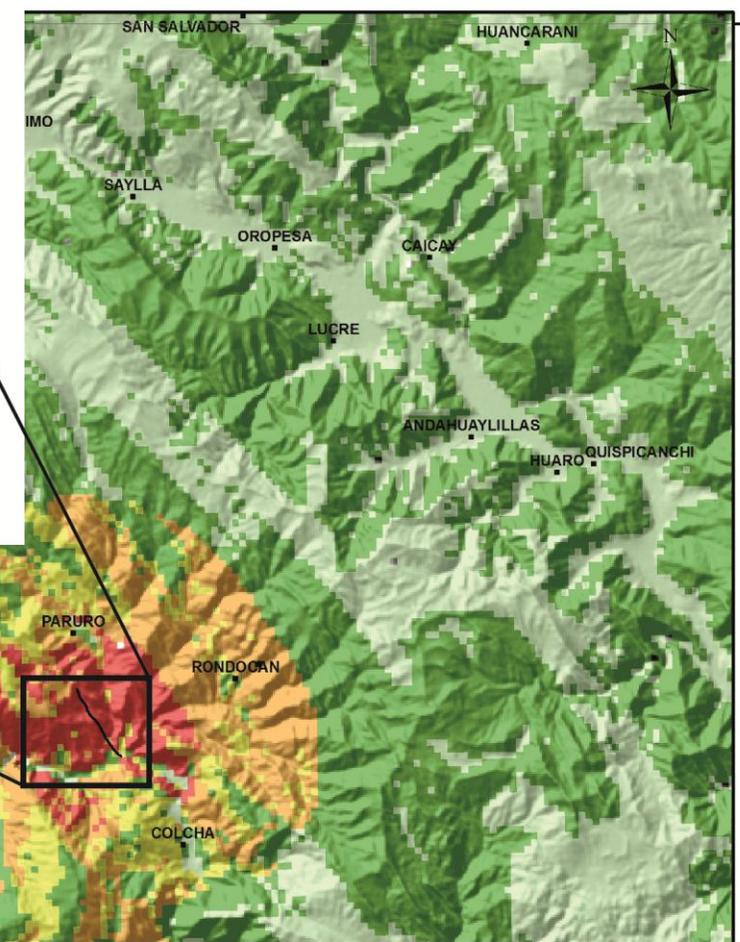
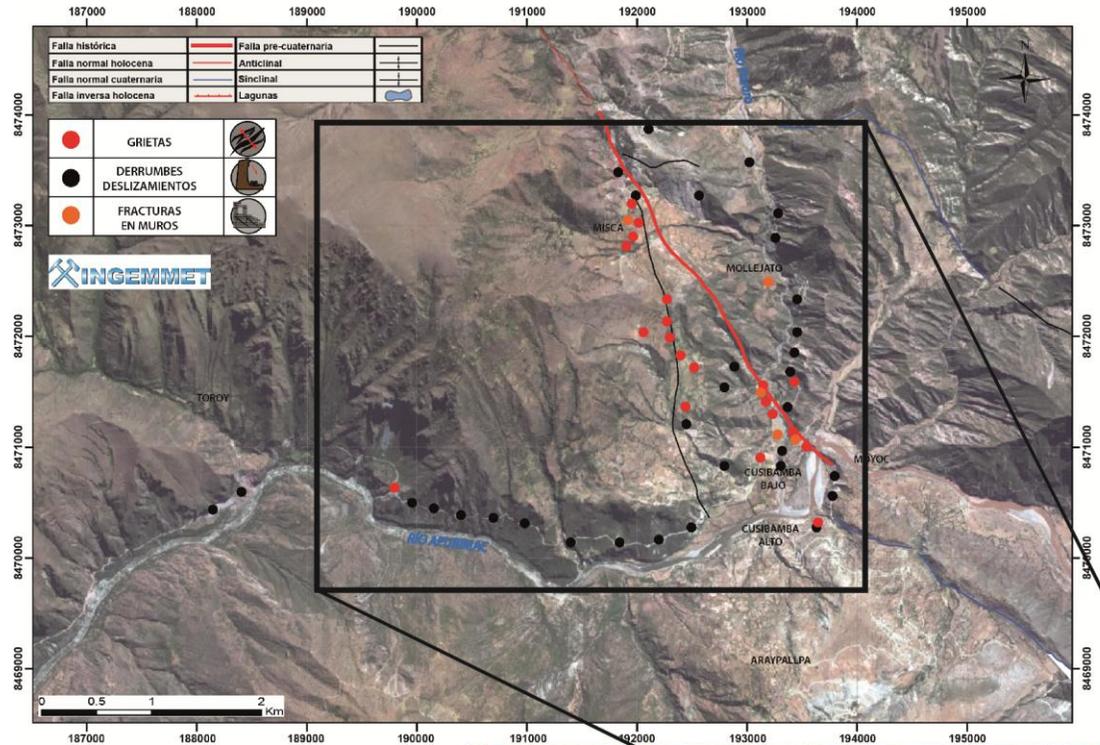
Metodología de la elaboración de los mapas de Amenazas a movimientos en masa y a licuefacción de suelos y/o asentamientos (Benavente et.al, 2013).



Mapa de peligrosidad por movimientos en masa, detonado por sismo del 27 de setiembre del 2014.



Mapa de peligrosidad por licuefacción de suelos y/o asentamientos, detonados por el sismo del 27 de setiembre del 2014.



GRADO DE PELIGROSIDAD	
Alta	Muy alta
	Alta
Moderada	Media
	Baja
Baja	Muy baja

Validación del mapa de peligros a a movimientos en masa detonados por el sismo del 27 de setiembre, con lo observado en campo.

ANEXO 2

ZONAS CRÍTICAS A LOS PELIGROS GEOLÓGICOS EN LA PROVINCIA DE PARURO, CUSCO

PROVINCIA DE PARURO

N°	SECTOR (DISTRITO) Provincia	PELIGRO GEOLÓGICO	LATITUD	LONGITUD	COMENTARIO GEODINÁMICO	VULNERABILIDAD DAÑOS OCASIONADOS	RECOMENDACIONES
55	Yaurisque, Ranracasa (Yaurisque) Paruro	Movimiento complejo (Deslizamiento Rotacional-flujo de tierra)	8486388	184773	Deslizamiento rotacional-flujo de tierra con un ancho de escarpa promedio de 450 m, el material removido se ha desplazado 3,5 km ladera abajo. Desplazamientos en temporada de lluvias está entre los 15 y 20 cm, terreno se presenta ondulado, removido e inestable, con formación de grietas transversales y terracetos en cerca de la escarpa principal del deslizamiento (comunidad de Ranracasa). Presencia de hasta 3 juegos de grietas paralelas detrás de la escarpa principal. (Foto 104 y 105)	Poblados de Huancarqui, Labranniyoc, Ccochapata, Cchaccar, Sucsohuayco, Minasmocco, Chilcachillcayoc, Curuchura, Rajchemocco, RanracasaToccorumi y Azulccochoa, asentados en el cuerpo del deslizamiento pueden ser afectados por desplazamientos violentos del terreno. Afecta 1,7 km de la carretera Yaurisque-Paruro. Afecta terrenos de cultivo. Un desplazamiento violento de terreno puede afectar poblado de Yaurisque, así como represar el río Yaurisque.	Implementar sistema de riego tecnificado de tipo aspersión. Drenaje de aguas subterráneas que aparecen en el cuerpo del deslizamiento, sacarlas fuera de la zona inestable. Implementar un sistema de alerta temprana en la comunidad de Yaurisque y sus anexos. Realizar el monitoreo del deslizamiento.

56	<p>Cusibamba Bajo-Huarobamba</p> <p>(Paruro, Pacaritambo) Paruro</p>	<p>Erosión fluvial, flujo de detritos, derrumbes</p>	8470843	189698	<p>Derrumbes activos en las quebradas tributarias del río Paruro (quebrada Jatunhuayjo) que generan flujos de detritos que se encausan y alcanzan el río Apurímac a la altura del poblado de Cusibamba Bajo, el cual es afectado con los materiales que acarrea y los procesos erosivos que genera.</p> <p>Tramo de unos 14 km de carretera que uno los poblados de Cusibamba Bajo con Huarobamba, Huata y Colquemarca, trazado en una ladera subvertical de la margen izquierda del río Apurímac, de los taludes inestables, se identificaron hasta siete tramos inestables desde donde se produce la caída de suelos y bloques de roca. (Fotos 106, 107 y 108)</p>	<p>Material caído desde el talud superior obstruye el paso de vehículos.</p> <p>Las caídas pueden comprometer la seguridad física de vehículos y personas que transitan por la zona.</p> <p>Perdida de plataforma de carretera por derrumbes del talud inferior.</p> <p>Flujo de detritos de gran magnitud puede afectar el poblado de Cusibamba Bajo y la carretera.</p>	<p>Limpieza de la carretera.</p> <p>En zonas donde las condiciones lo permitan, se deben realizar trabajos de estabilización del talud superior de carretera mediante el perfilado o cortando terrazas.</p> <p>Encauzamiento del río Paruro con gaviones.</p> <p>Las viviendas del Cusibamba Bajo no deben de ser construidas cerca del cauce del río Paruro.</p> <p>Contemplar la posibilidad de reubicación de poblado.</p>
----	---	--	---------	--------	--	---	---

Tomado de Vilches (2013)



Foto 1: Escarpa del deslizamiento-flujo de tierra de Ranraccasa.



Foto 2: Vista del cuerpo del deslizamiento-flujo de tierra, en el fondo el poblado de Yaurisque.



Foto 3: Carretera Cusibamba Bajo-Huaro Bamba trazado en la margen izquierda del valle del río Apurímac, en una ladera que supera los 40° de inclinación.



Foto 4: Talud de corte vertical de casi 40 m de altura, muy inestable, desde donde se produce la caída de bloques de roca y suelo.



Foto 5: Valle del río Paruro y del poblado de Cusibamba bajo asentado en su margen izquierda cerca a la desembocadura en el río Apurímac, afectado por procesos de erosión fluvial y huaycos, se han colocado espigones con gaviones para evitar que el poblado se afectado.



Foto 6: Localidad de Cusibamba Bajo, obsérvese los daños ocasionados por flujos de detritos y erosión causados por lluvias excepcionales. También flujos de detritos pueden ser ocasionados por los derrumbes y deslizamientos que se pueden producir quebrada arriba. Frente a Misca (al NE) se observa un deslizamiento activo que puede dañar Cusibamba Bajo.

LISTADO DE FOTOS Y FIGURAS

FOTOS

- Foto 1: Vista panorámica de un segmento de la Falla Paruro en donde se pueden observar el desnivel generado en la superficie producto de la actividad tectónica. La traza pone en contacto areniscas y lutitas de coloración rojiza con depósitos aluviales y coluviales de edad cuaternaria.
- Foto 2: Deslizamiento en la carretera Paruro – Accha, margen derecha del río Apurímac.
- Foto 3: Deslizamientos traslacionales en areniscas. Tramo Misca – Cusibamba, margen izquierda del río Paruro.
- Foto 4: Deslizamiento – flujo situado a la entrada del poblado.
- Foto 5: Caída de derrubios en el tramo de la carretera Paruro - Misca
- Foto 6: Caída de rocas en tramos de la carretera Cusibamba-Tincoc.
- Foto 7: Grieta en el poblado de Misca afectando el camino, un muro y una vivienda, presenta una dirección N65° y una abertura máxima de 10cm.
- Foto 8: Grieta en el poblado de Misca, tiene una longitud de 15m con dirección preferente N110°, la abertura máxima es de 7 cm, se observa un tipo de movimiento sinistral.
- Foto 9: Grieta en terreno de cultivo, tiene una longitud de 15m con dirección preferente N110°, la abertura máxima es de 7 cm, se observa un tipo de movimiento sinistral.
- Foto 10: Grieta en la carretera Paruro-Accha, tiene una longitud de 45 m, en a) se muestra el tipo de movimiento y la dirección N152°, b) la abertura máxima es de 10 cm, c) se observa un desnivel de 2.5-3cm, la dirección de movimiento N55°.
- Foto 11: Grieta en el poblado Cusibamba Bajo, tiene una longitud de 25m y afecta la carretera, la dirección principal es N112° y su abertura máxima con 10cm, se observa como las grietas estas en dirección de una vivienda destruida
- Foto 12: Grieta en el poblado Cusibamba Bajo, tiene una longitud de 100 m, su dirección es N126°, una abertura máxima de 20cm y una profundidad de 120cm. viene afectando terrenos de cultivo y la prolongación de esta grieta está alineada a las viviendas destruidas en esta localidad.
- Foto 13: Grieta en la carretera Paruro – Accha, margen izquierda del río Apurímac, presenta una dirección N85°, una abertura máxima de 10cm y presenta un desnivel de 6cm hacia el norte. Se observa que la prolongación de la grieta termina en un deslizamiento.
- Foto 14: En el cuadro rojo se aprecia el agrietamiento y como bascula el muro, por efecto de deformación en el terreno, ocasionado por el sismo del 27 de setiembre.
- Foto 15: Daños en las viviendas y templo en Misca por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción.
- Foto 16: Viviendas destruidas en Misca, obsérvese el tamaño de los mismos (dos pisos) y su diseño estructural (sin refuerzos).
- Foto 17: a) Vista de la zona de reubicación temporal. b) Vista panorámica de la zona de reubicación (Sector Casapampa, al sur de Misca).
- Foto 18: Viviendas de adobe en el poblado de Misca que no se destruyeron, sufrieron pocos daños fijese los refuerzos y columnas.
- Foto 19: Diseño de una vivienda de concreto armado que no sufrió agrietamientos, en el poblado de Misca.
- Foto 20: En a) se muestran los daños en viviendas, y b) muestra el centro educativo de Cusibamba colapsado. Esta comunidad fue afectada por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción.
- Foto 21: En a) derrumbe generado por el sismo, en b) se observa una grieta en el terreno generada por el movimiento sísmico.
- Foto 22: a) Vista panorámica de la zona de reubicación de Cusibamba Bajo tomado de la margen izquierda del río Apurímac en rojo área de reubicación, en negro franja marginal y en verde defensa ribereña. b) Vista del lugar de reubicación. c) Vista panorámica de los terrenos de la comunidad de Cusibamba para su reubicación.

FIGURAS

- Figura 01: Mapa de ubicación del sismo del 27 de setiembre del 2014, el mecanismo focal (Fuente: IGP) indica un movimiento de tipo normal con una componente sinistral.
- Figura 02: Mapa geológico de la zona de evaluada. (Modificado de Carlotto et al., 2011).
- Figura 03: Distribución de las fallas en la región Cusco, donde se observa que la falla Paruro es una estructura, que, desde el cuaternario y en la actualidad tiene un movimiento de tipo normal (Benavente et.al, 2013).
- Figura 04: Sistema de Fallas Chinchaypujio-Paruro-Acomayo.
- Figura 05: Segmento norte de la Falla Paruro donde se muestra la distribución de la deformación en estructura tipo cola de caballo o echelón.
- Figura 06: En líneas negras se observa los segmentos de la Falla Paruro localizada al sur de Paruro (Parte central).
- Figura 07: En línea roja se observa el segmento reactivado de la falla Paruro que origino el sismo del 27 de setiembre de 2014 (Segmento Misca y Cusibamba).
- Figura 08: Mapa de inventario de eventos cosísmicos producidos por el sismo del 27 de setiembre de 2014.
- Figura 09: Diagrama de distribución de efectos cosísmicos (efectos directos) de terremotos en yacimientos arqueológicos (Rodríguez-Pascua et al., 2011).
- Figura 10: Tabla de clasificación de los Efectos Arqueológicos de Terremotos (Earthquake Archaeological Effects: EAE).
- Figura 11: Mapa de ubicación y orientación de las grietas en el terreno.
- Figura 12: Momento de deformación de infraestructura y sustrato. a) se observa el paso de las ondas sísmicas, afecta las edificaciones debido a la deformación elástica del sustrato (suelo), pero debido al tipo de suelo este puede quedar deformado permanentemente, pueden observarse en el terreno vasculamientos, plegamientos, fracturas y grietas. b) se observa el paso de las ondas sísmicas, afecta las edificaciones debido a la deformación elástica del sustrato (suelo), pero debido al tipo de suelo este no sufre ninguna deformación permanentemente, solo se puede observar en el edificaciones debido a la dirección de agrietamientos y/o deformaciones las dirección de las ondas sísmicas. (Tomado de Giner-Robles et al., 2011).
- Figura 13: Diferentes patrones de fracturación en un muro por deformación permanente del terreno. La distribución y simetría de las fracturas se puede asociar a una geometría en la deformación del terreno. Estas deformaciones permanentes en el terreno pueden deberse a diferentes procesos, entre ellos la sismicidad. No obstante, es bastante complejo poder establecer el origen de las deformaciones en el sustrato sin realizar un análisis conjunto con otro tipo de deformaciones (análisis de grietas cosísmicas en el terreno). Como la respuesta de los muros depende directamente de la deformación del terreno, lo más adecuado es analizar la deformación del terreno (Flechas rojas). (Modificado de Arcos y Portu, 2003).
- Figura 14: Fracturas conjugadas. Fracturación de un muro por movimientos sísmicos de carácter cíclico y paralelos al mismo. Suelen aparecer con mucha frecuencia en muros de ladrillo. Se producen fisuras en cada uno de los ciclos, provocando fracturas conjugadas (en forma de cruz o aspa) que suelen aparecer con un ángulo de 45°. Este tipo de deformaciones son producidas por las ondas sísmicas y no implican la deformación permanente del terreno; son el resultado del comportamiento frágil del muro frente a las deformaciones elásticas inducidas por las ondas sísmicas. (Tomado de Giner-Robles et al., 2011).
- Figura 15: Patrones de fracturación de un muro inducidos por cargas horizontales. Los dos primeros (a y b) se forman por movimientos cíclicos paralelos a la traza del muro (fracturas conjugadas) (ver figura 7.24). Los patrones de fracturación del caso (d) se forman por movimientos perpendiculares al muro. En el caso del patrón de fisuración (c) puede estar producido tanto por movimientos perpendiculares como paralelos al muro. No obstante, en terremotos instrumentales este último tipo de fracturación suele indicar un movimiento perpendicular a la estructura muraria. (Tomado de Giner-Robles et al., 2011).

- Figura 16: Construcción idealizada con los Efectos Arquitectónicos de Terremotos (EAEs) teóricos que generaría un movimiento sísmico con un desplazamiento del sustrato en dirección NO-SE (tomado de Rodríguez-Pascua et al., 2013).
- Figura 17: Evaluación de fracturas y grietas, poblado de Misca.
- Figura 18: Inventario de movimientos en masa que se encuentran en el poblado de Misca, donde se observa en líneas punteadas rojas el trazo del segmento reactivado, cárcavas, deslizamientos y derrumbes.
- Figura 19: Zonas de reubicación para la localidad de Misca: 1) Reubicación temporal sobre poblado actual. 2) Reubicación del poblado.
- Figura 20: Inventario de movimientos en masa que se encuentran en el poblado de Cusibamba, donde se observa que el mayor peligro por su ubicación es la erosión fluvial (flechas negras y líneas azules) y los flujos de detritos.
- Figura 21: Posibles zonas de reubicación de Cusibamba Bajo (cuadros rojos). Teniendo en cuenta principalmente la acción erosiva de la quebrada Paruro (flecha azul). Zonas de erosión de riberas y posibles flujos de detritos con flechas rojas. Obras de defensa ribereña (cuadro plomo).