



**SGP**  
FUNDADA 1924

**Boletín de la Sociedad Geológica del Perú**

Journal homepage: [www.sgp.org.pe](http://www.sgp.org.pe)

ISSN 0079-1091

## Evaluación geológica post-sismo del 14 de agosto del 2016: reactivación de la falla Yanque, Arequipa

**Gabino F. Delgado, Carlos Benavente, Luis Albinez, Enoch Aguirre, Edu Taipe**

Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico INGEMMET, Av. Canadá 1470, Lima, Perú. ([gdelgado@ingemmet.gob.pe](mailto:gdelgado@ingemmet.gob.pe))

### ABSTRACT

Colca fault system presents intense seismic activity and the last earthquake confirms it. This event was the result of Yanque fault reactivation. It was a shallow quake (hypocenter depth 8km) with 5.3 ml magnitude, which generated significant coseismic effects (rockfalls, landslides, sinkholes and others) inside influence area, where it affected roads (highways and roads), agricultural land and housing; an also fatalities. The damage occurred derived from the unconsolidated deposits found throughout the valley where the villages of Ichupampa, Yanque and Achoma are located, and inefficient types of construction used.

### RESUMEN

El sistema de fallas del Colca presenta una intensa actividad sísmica confirmada por el evento sísmico del 14 de agosto de 2016, que fue producto de la reactivación de la Falla Yanque. Fue un sismo superficial (hipocentro 8 km de profundidad) con una magnitud de 5.3 MI, que detonó importantes efectos cosísmicos (desprendimientos de rocas, derrumbes, deslizamientos, grietas en el terreno y otros) en el área de influencia, afectando vías de comunicación (carreteras y caminos vecinales), terrenos de cultivo y viviendas, además de la pérdida de vidas humanas. Los daños ocurridos derivan de los depósitos inconsolidados que se encuentran en todo el valle en donde se emplazan los pueblos de Ichupampa, Yanque y Achoma, y a los ineficientes tipos de construcción utilizados.

**Palabras claves:** Sismo, falla Yanque, efectos cosísmicos

### 1. Introducción

El 14 de agosto de 2016 a las 21:58 (Hora local), ocurrió un sismo de magnitud 5.3 ML (escala de Richter), a una profundidad de 8 Km (Fuente: IGP) [Ver Figura 1].

El movimiento sísmico generó daños importantes en las localidades de Ichupampa, Yanque, Achoma, Maca, Coporaque y las localidades aledañas del Valle del Colca, provincia de Caylloma.

Las observaciones de campo y cartografiado post sismo sugieren que el sismo, está relacionado con la reactivación de una falla geológica, denominada Falla Yanque. Cabe resaltar que esta falla forma parte del Sistema de las fallas del Valle del Colca (Benavente et al., 2016). No se ha encontrado desplazamiento superficial o ruptura

superficial (salto de falla), sin embargo si se evidencian grietas co-sísmicas alineadas a lo largo de la falla.

### 2. Contexto Geomorfológico y Geológico

El Valle del Colca se encuentra en la parte media de la Cuenca del Río Camaná – Majes – Colca. Se caracteriza por tener una geomorfología y geología compleja, donde interactúan procesos tectónicos, volcánicos, climáticos y de movimientos en masa que dan lugar a un relieve abrupto. En tal sentido, el valle del Colca presenta en ambos márgenes montañas con pendientes elevadas y constituidas de rocas volcánicas y sedimentarias. El fondo de valle está constituido o colmatado por depósitos no consolidados, derivados de avalanchas, deslizamientos, lacustres, fluviales y fluvio-glaciares (Figura 2).

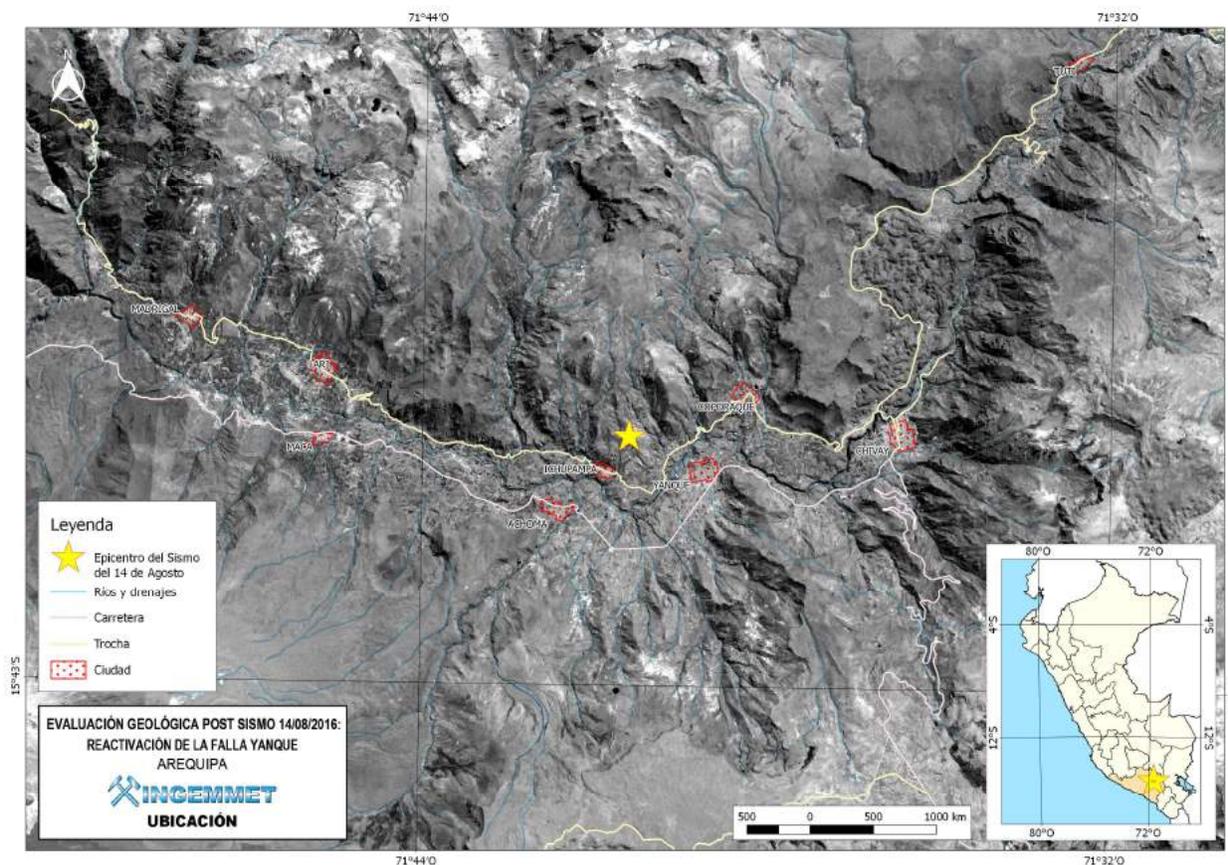


Figura 1. Mapa de ubicación del sismo del 14 de agosto del 2016.

## 2.2. Contexto Geológico

Dentro de la estratigrafía, en la zona de estudio se encuentran pequeños afloramientos del grupo Yura. En ambos márgenes del valle se observa rocas del Grupo Tacaza, compuesto de rocas volcánicas andesíticas. Se observan complejos volcánicos Mio-pliocenos del Grupo Barroso estos se encuentran emplazadas en las partes altas de los flancos del valle. Sus cumbres conservan la morfología de morrenas cuaternarias. Al norte de Chivay se observan bien conservados los pulsos lávicos cuaternarios del Grupo Andahua inferior; y los depósitos lacustres se encuentran emplazados en el fondo de valle acompañados de depósitos aluviales generados por eventos locales (Figura 3).

## 3. Descripción Geológica – Estructural de la zona de fallas del Valle del Colca.

El Valle Colca se ubica dentro de la Zona Volcánica de los Andes Centrales, esta zona se encuentra constituida por estratovolcanes con un cráter central, domos y conos monogenéticos de escorias de lavas asociados a flujos <10 000 B.P (Delacour et al., 2007; De Silva & Francis, 1991). Los depósitos volcánicos cuaternarios muestran

evidencias de haber sido erosionados y retrabajados por la actividad glacial, es así, que observamos morrenas y depósitos fluvio-glaciares cubriendo dichos depósitos.

En la actualidad la actividad sísmica en el área es elevada, es así que Benavente et al. (2010, 2012) describen un control estructural NO-SE en el arco volcánico Cuaternario a lo largo de aproximadamente 300 km, corredor estructural conformado por fallas normales principalmente con buzamientos opuestos y que cortan depósitos volcánicos cuaternarios, depósitos fluvio-glaciares y aluviales. Asimismo, Sébrier et al. (1985) estudian las fallas de Trigal y Solarpampa, ubicadas en las alturas del Cañon del Colca, entre las localidades de Huambo y Cabanaconde, fallas con orientaciones E-O, constituidas por segmentos que se extienden a lo largo de 30 km cortando depósitos volcánicos cuaternarios y fluvio-glaciares. David (2007) y Antayhua (2002) analizaron la actividad sísmica de esta área, identificando su distribución tanto en superficie como en profundidad y hallando mecanismos focales con soluciones de tipo normal, siendo compatible con lo observado en el terreno. Benavente et al. 2016 (en revisión) presentan una actualización del mapa neotectónico del Valle del Colca, poniendo en evidencia con registros geológicos, 14 nuevas fallas activas (Figura 4). Una de ellas viene a ser la falla Yanque.

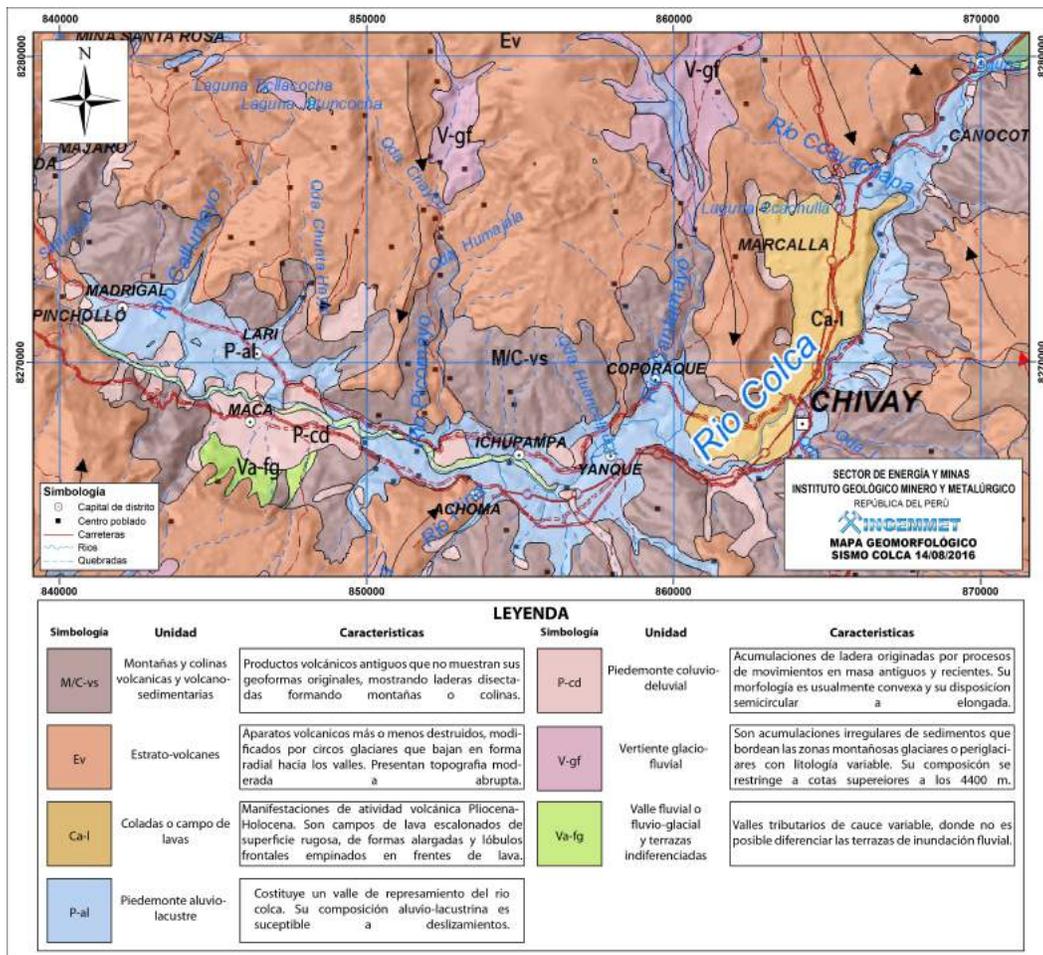


Figura 2. Mapa geomorfológico del Valle del Colca. Modificado de Zavala et al., 2014.

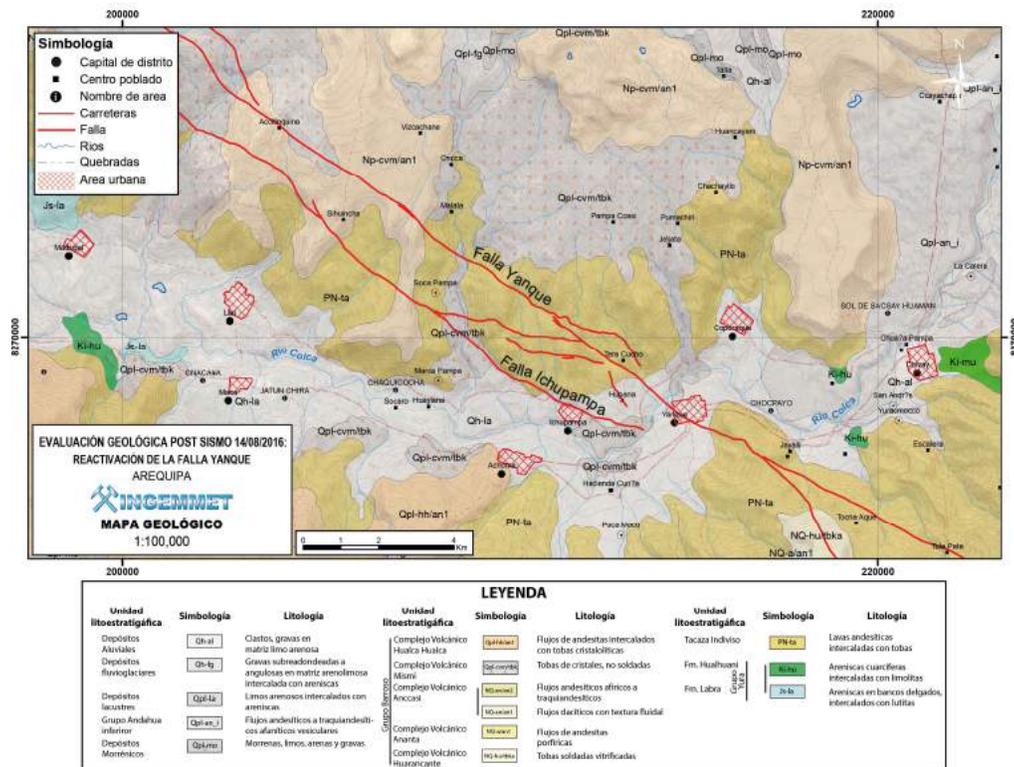
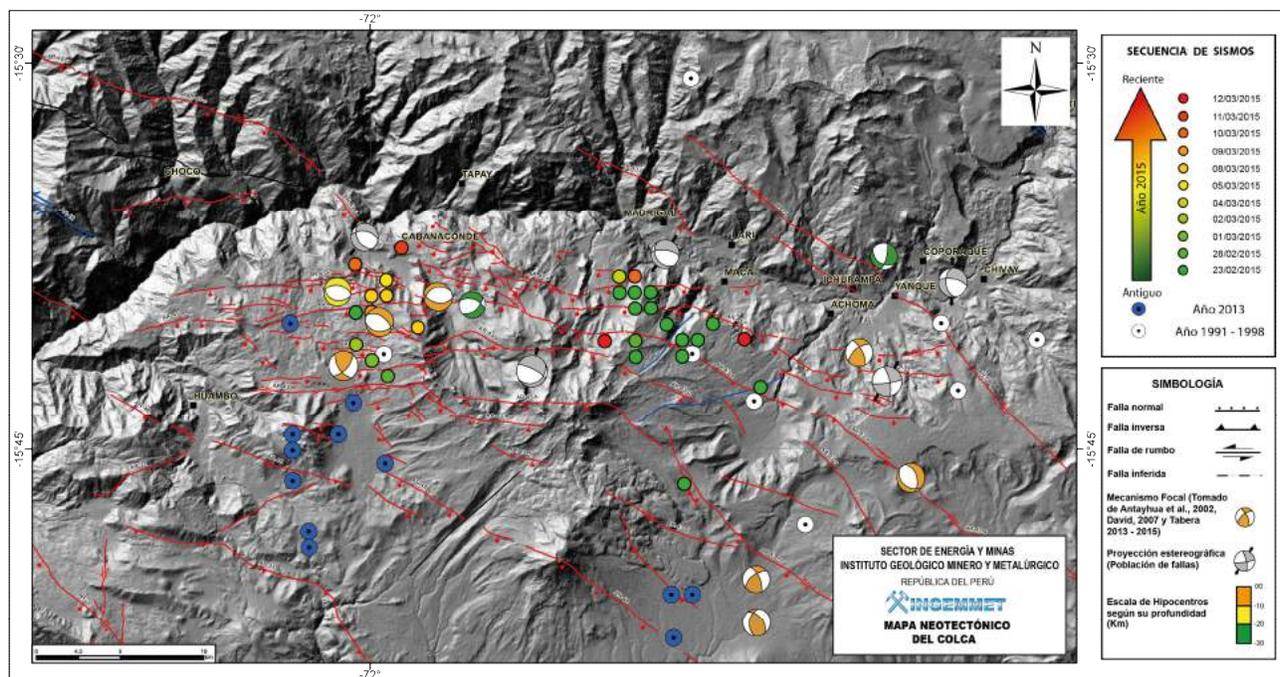


Figura 3. Mapa geológico del Valle del Colca. Modificado de Palacios et al., 1993.



**Figura 4.** Mapa neotectónico del valle del Colca, las líneas rojas indican las fallas activas de las zonas, estudiadas e identificadas en campo. La recopilación de eventos sísmicos registrados desde el año 1991 hasta la fecha (IGP), demuestra la alta actividad sísmica de la zona.

### 3.1. Falla Yanque

Tiene una longitud aproximada de 37 kilómetros, que al contar con varios segmentos se comporta como un sistema de fallas (Figura 5). Parte de este segmento se reactivó, generando el sismo superficial del 14 de agosto de 2016. Su dirección promedio es de N120° y al atravesar el Valle del Colca, se puede observar su continuidad en ambos márgenes del valle. Benavente et al, (2016) indican que en la margen derecha a 4800 msnm en la Pampa Arenal, se presenta un escarpe de la Falla Yanque con 2 metros de altitud que afecta depósitos volcánicos y aluviales, así mismo se observa las formaciones de sangpond, producto de la ruptura superficial de la falla. Hacia la margen izquierda se observan facetas triangulares asociadas a la falla, que presentan escarpes de hasta 50 m. Se identificaron también depósitos lacustres, aluviales, coluviales y fluvio-glaciares que se encuentran deformados por la actividad de la falla, lo que indicaría una historia de reactivaciones durante el Cuaternario y que se repite en la actualidad.

Se tomó los estudios detallados de Benavente et al, (2013, 2016 en revisión) sobre fallas geológicas, como base metodológica para generar los mapas de peligrosidad de movimientos en masa y procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos detonados por el sismo. Estos mapas se calcularon a partir de las interacciones entre los mapas de susceptibilidad (e.g. mapas de movimientos en masa y procesos de licuefacción de suelos) y mapas de iso-aceleraciones sísmicas en base a la magnitud que generó la reactivación de la falla Yanque el 14 de agosto del presente año (5.3 ML). La Figura 6

muestra el modelo numérico que determina el grado de peligrosidad alta, media y baja para este evento sísmico.

Es necesario precisar que las observaciones geológicas, nos permite indicar que esta falla es capaz de generar sismos > 6.5 Mw, debido a que se identificaron evidencias de ruptura superficial primaria; en tal sentido el sismo del 14 de agosto no es la máxima magnitud posible que la falla Yanque puede generar.

## 4. 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 de licuefacción de suelos. 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 (poblados afectados), (ver Figura 7).

### 4.1. Efectos Geológicos

Vienen a ser todos los procesos de movimientos en masa (deslizamiento, derrumbes, caída de roca, etc) y las grietas en el terreno que se generaron con el movimiento sísmico. La metodología de análisis aplicables a estos efectos, son las técnicas clásicas de geología, ya que se tienen análisis pre y post sismo.

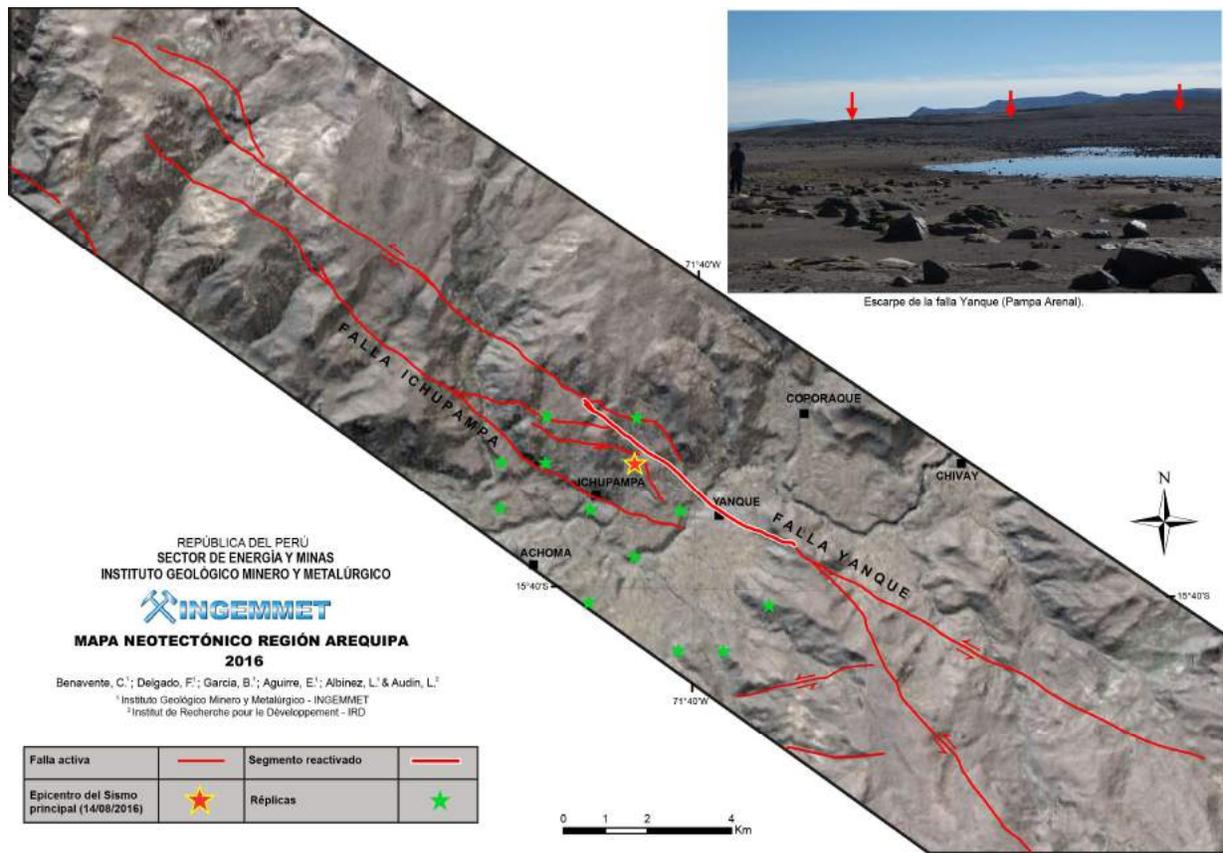


Figura 5. Falla Yanque y falla Ichupampa. La línea gruesa de color rojo con bordes blanco, es el segmento reactivado que generó el sismo del 14 de agosto.

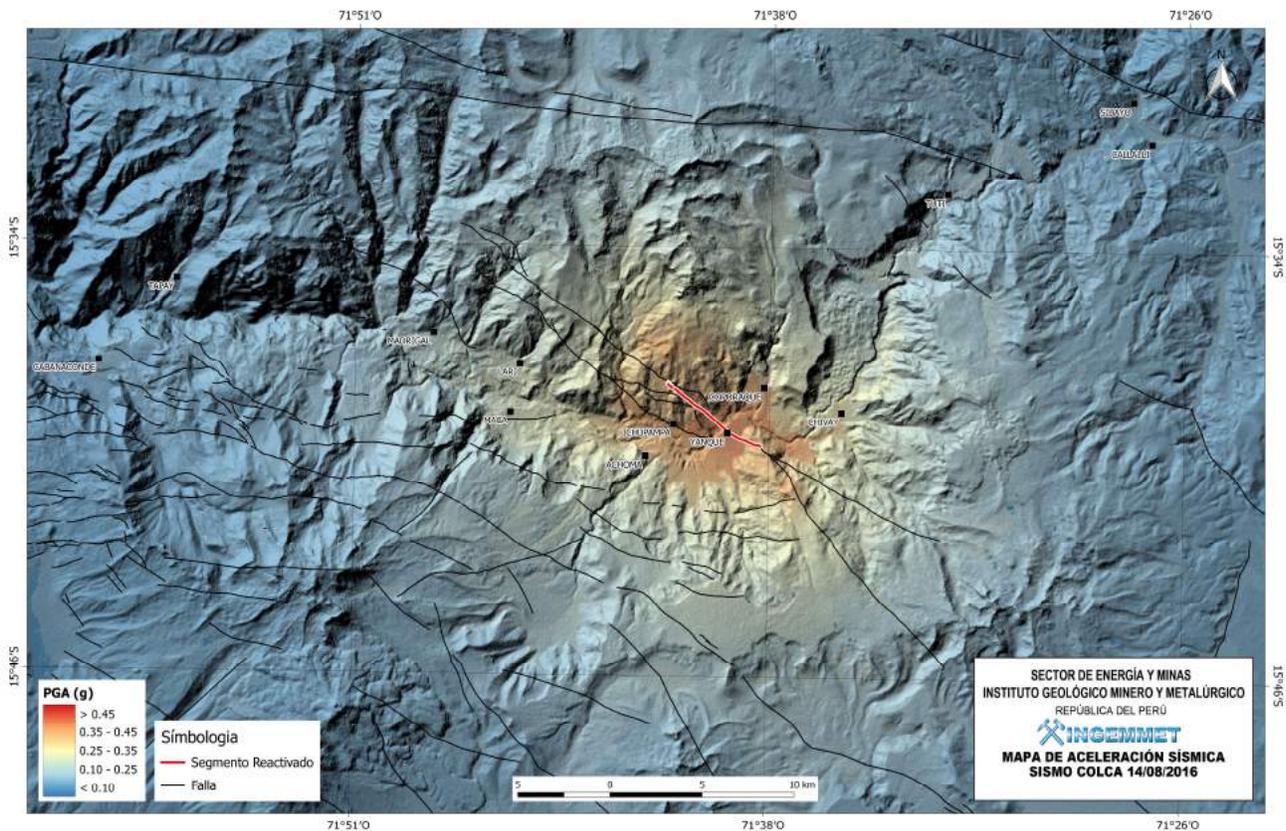


Figura 6. Mapa de aceleración sísmica. En línea roja se observa el segmento reactivado de la Falla Yanque que origino el sismo del 14 de agosto de 2016.



Figura 7. Diagrama de distribución de efectos cosísmicos (efectos directos). (Tomado de Rodríguez-Pascua et al., 2011)

Zavala et al. (2016) realizaron a lo largo del valle del Colca, en los últimos años, un inventario de movimientos en masa agrupándolos por flujos, deslizamientos, caídas, movimientos complejos, reptaciones y vuelcos como parte

del inventario de peligros geológicos de la cuenca del río Colca, donde indica que los sectores con gran distribución de movimientos en masa están entre Sibayo-Tuti-Canocota-Chivay-Coporaque-Ichupampa-Lari-Achoma-Maca-Madrigal; las más importantes en dimensión son las avalanchas de rocas en Tuti antiguo, cerro Llancuypiña, quebrada El Molino, río Sepina, quebrada Japo (Maca) y la falda sur del volcán Hualca Hualca; entre los abanicos de flujos de detritos destacan los de Challacone, Ccayachape, Coporaque, Tucullune, Sepina, Marcapampa entre otros. Entre los deslizamientos y movimientos complejos sobresalen el de Maca, Madrigal-Lari, Antahuilque, Sihuincha y en la quebrada Sahuayllo (mina Madrigal).

El sismo del 14 de agosto, generó procesos de movimientos en masa, muchos de ellos fueron reactivaciones de antiguos deslizamientos y avalanchas (Figura 8), los eventos que se cartografiaron fueron deslizamientos, derrumbes y caída de rocas que principalmente afectaron las vías de comunicación.

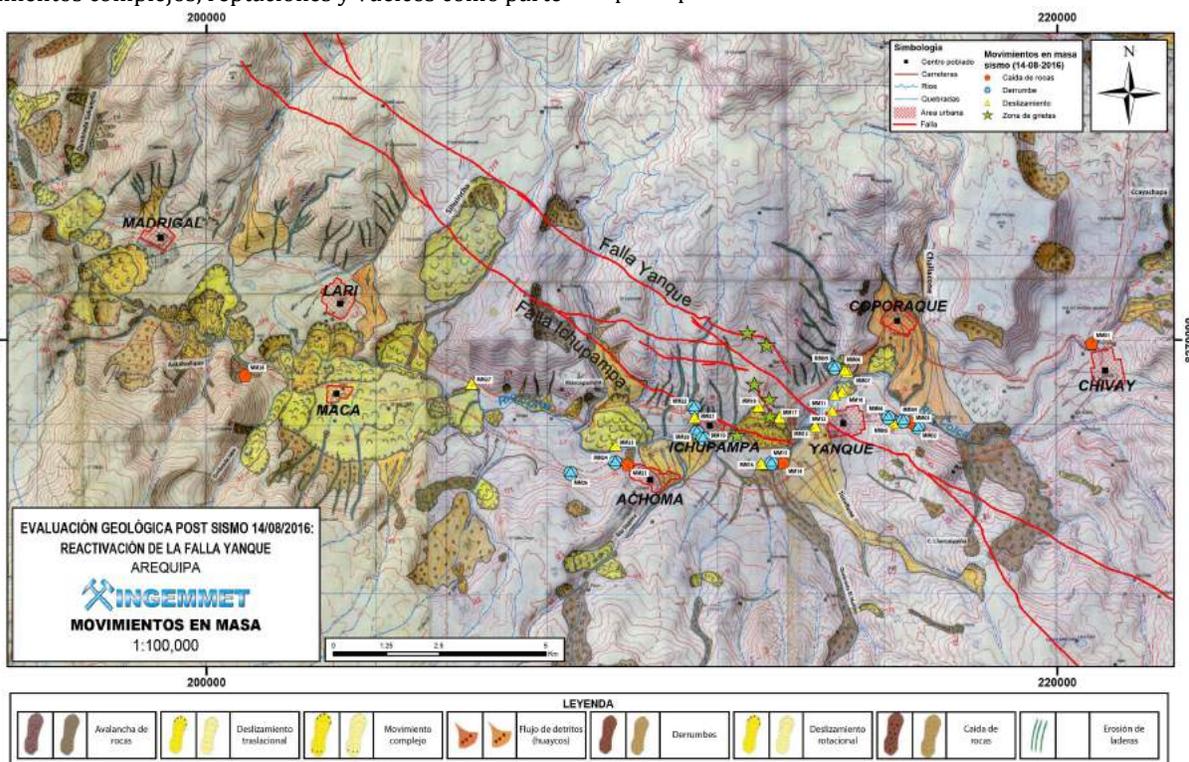


Figura 8. Mapa de inventario de movimientos en masa producidos por el sismo del 14/08/2016. (Mapa Base tomado de Zavala et al., 2008).

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

4.1.1. Deslizamientos

En la zona evaluada la mayoría de los deslizamientos observados son superficiales (Figura 8), principalmente se encuentran en cortes de carretera (ej. En la carretera Coporaque-Ichupampa-Lari y en Yanque en la margen izquierda el río Colca, entre otros). Ver Foto 1.

4.1.2. Caída de Rocas - Derrumbes

Principalmente se observan caídas de roca y derrumbes

en el Valle (Figura 8) y otros que afectan las carreteras que unen los centros poblados (ej. En la carretera Chivay-Yanque y Achoma-Maca). Foto 2.

4.1.2. Fracturas y Grietas

En la zona evaluada, estas afectan vías de comunicación y terrenos de cultivo (Figura 8). Se evidencian agrietamientos en zonas muy cercanas a los segmentos reactivados (Fotos 3, 4; Figura 9). En el sector de Hupana al noreste de Ichupampa la dirección preferente de las grietas son N120° y llegan a tener aberturas de hasta 10cm.



**Foto 1.** Deslizamiento en la carretera Coporaque - Ichupampa, margen derecha del río Colca.



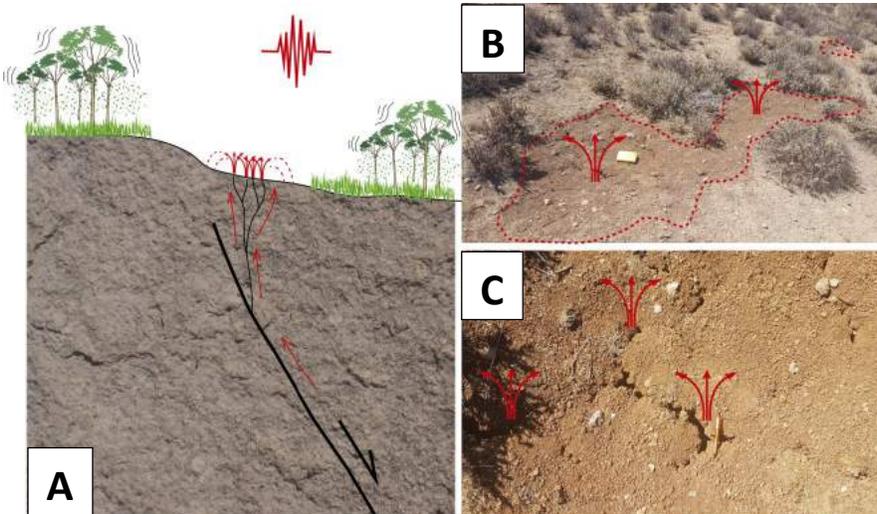
**Foto 3.** Grietas en el terreno generadas por el sismo del 14 de agosto, llegando a presentar abertura de hasta 10 cm.



**Foto 2.** Caída de rocas (Derrumbe) en el tramo de la carretera Achoma-Maca. Margen izquierda del río Colca.



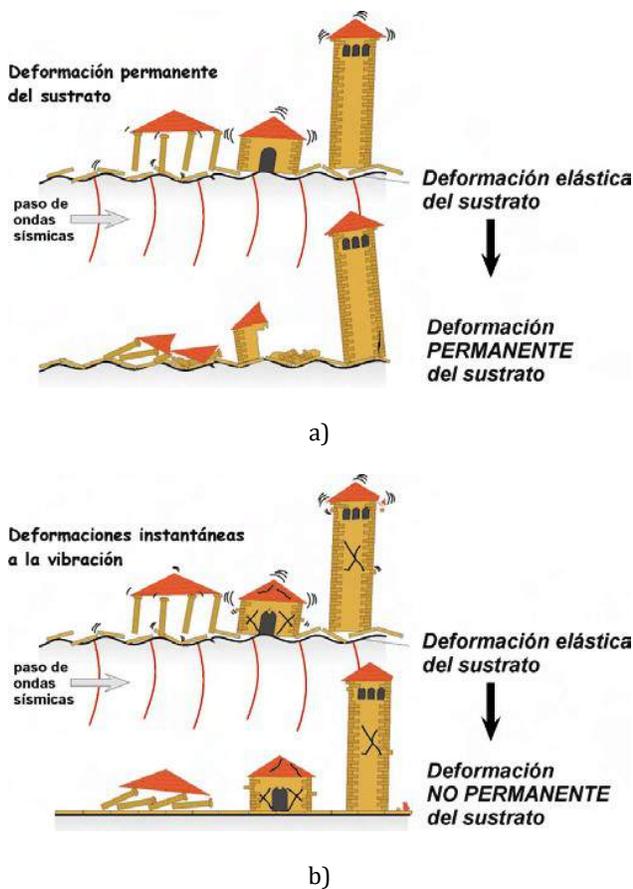
**Foto 4.** Se observa bloques movidos, en algunos casos volteados, por la vibración del terreno frente a las ondas sísmicas.



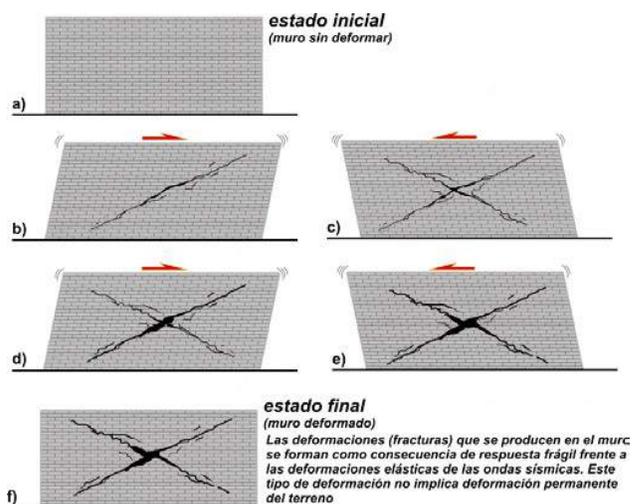
**Figura 9.** Grietas y licuefacción de suelos. Se observa material expulsado del subsuelo a través de zonas de debilidad (grietas). Este material o depósitos son de color diferente al observado en superficie y con grado de cohesión bajo. A) interpretación sobre la relación de las grietas y la licuefacción; estos suelos expuestos en superficie están relacionados con la sacudida del terreno y sólo se observan a lo largo de la traza de la falla Yanque. B) disposición lineal de estos depósitos expulsados (ver libreta como escala). C) detalle de las grietas, con aberturas de 5 cm, y del material expulsado a través de ella.

#### 4.2. Efectos en las construcciones (Localidades afectadas)

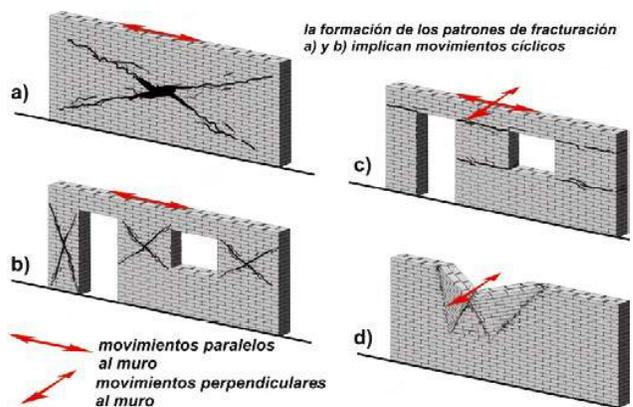
Estos efectos están representados por los daños generados en las poblaciones (edificaciones e infraestructuras) por efecto del paso de las ondas sísmicas (Figura 10). Se producen como respuesta frágil a las deformaciones elásticas del sustrato; este tipo de fracturación corresponde a los efectos del terremoto enmarcados dentro de las deformaciones instantáneas a la vibración (Figuras 11 y 12): fracturas penetrativas y fracturas conjugadas.



**Figura 10.** 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 basculamientos, 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 11.** 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).

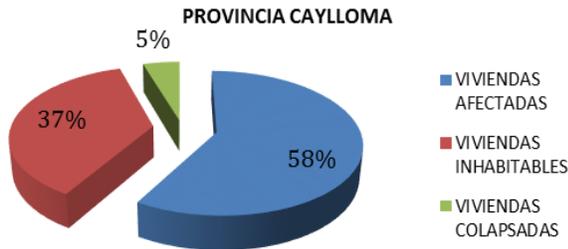


**Figura 12.** Patrones de fracturación de un muro inducidos por cargas horizontales. Los dos primeros (a y b) se forman por movimientos cíclicos paralelos a la traza del muro (fracturas conjugadas) (ver Figura 7.24). Los patrones de fracturación del caso (d) se forman por movimientos perpendiculares 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)

#### 4.2.1. Localidades Afectadas

Debido al sismo generado por la reactivación de la Falla Yanque muchas de las poblaciones que se ubican dentro del Valle del Colca fueron afectadas, llegando a generar la destrucción de infraestructura y la muerte de 4 personas.

De la totalidad de viviendas empadronadas a lo largo del Valle de Colca, 2939 viviendas sufrieron daños y fueron catalogadas en tres tipos de viviendas (Indeci, 2016) [Figura 13]



**Figura 13.** Distribución de las viviendas que sufrieron daños a lo largo del Valle del Colca.

Las viviendas afectadas tienen presencia de fisuras superficiales y poco importantes en paredes, las cuales no ponen en riesgo la integridad física de las personas, por tanto pueden ser reparadas y seguir siendo habitadas. De este tipo de viviendas afectadas por el sismo del 14 de agosto se identificaron 1719 en todo el valle del Colca (Indeci, 2016).

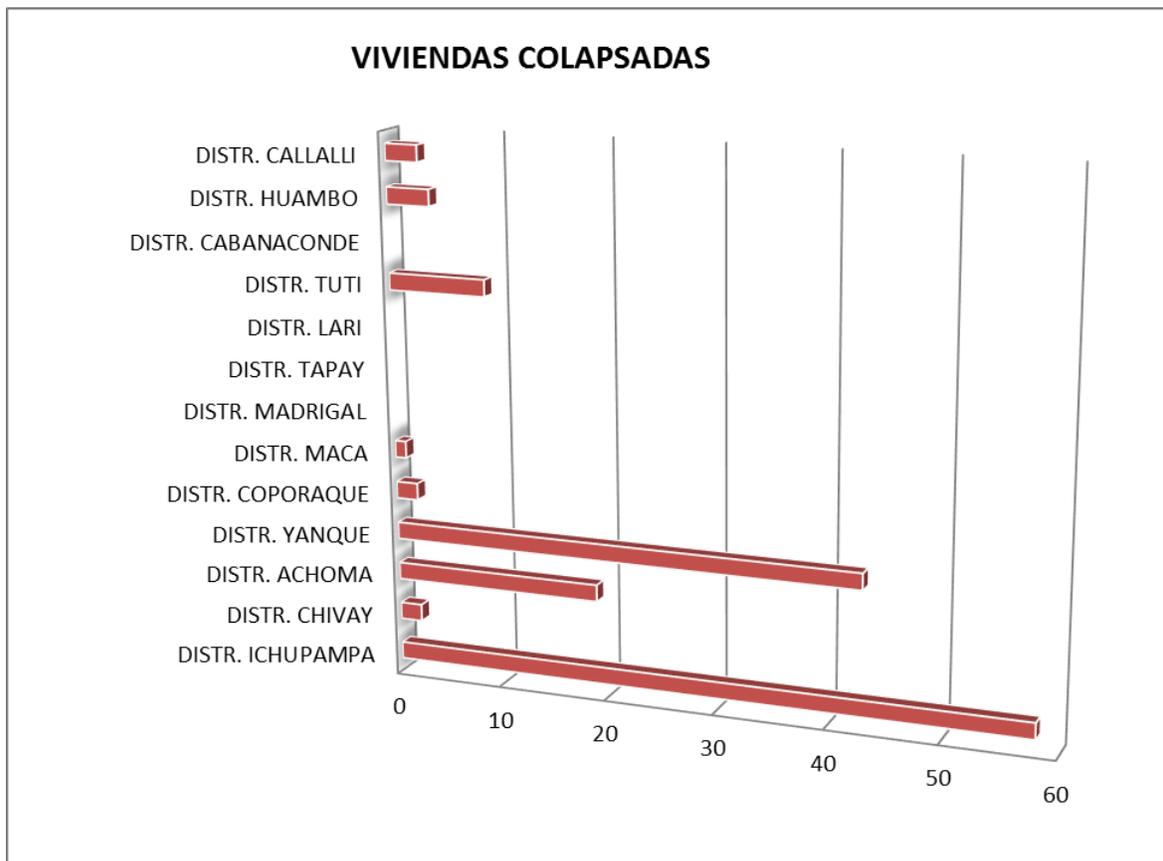
Las viviendas inhabitables tienen grietas y/o daños de consideración en paredes y techos, por tanto no pueden ser habitadas por presentar riesgo de colapso. De este tipo de viviendas afectadas por el sismo del 14 de agosto se identificaron 1079 en todo el valle del Colca (Indeci, 2016).

Las viviendas colapsadas son aquellas cuyos techos y paredes han colapsado debido al movimiento sísmico y evidentemente no pueden ser habitadas. De este tipo de viviendas afectadas por el sismo del 14 de agosto se identificaron 141 en todo el valle del Colca (Indeci, 2016), de los cuales los distritos de Ichupampa, Yanque y Achoma, presentaron mayores viviendas colapsadas (Figuras 14 y 15).

#### 4.2.2. Comparación del modelo de aceleración Sísmica con Mapas de Infraestructura Colapsada

Se generaron escenarios de atenuación de la aceleración teniendo en cuenta la fuente sismogénica (Falla geológica), la magnitud (máxima posible o registrada), cinemática, geometría de la falla y propiedades litológicas de la zona de influencia.

En la Figura 15 se observa en colores de tonalidades rojas (ver escala de colores), las aceleraciones máximas y la atenuación hacia los extremos. La zona en donde se concentra la mayor aceleración se ubica adyacente a la falla Yanque.



**Figura 14.** Distribución de viviendas colapsadas por distritos a lo largo del Valle del Colca, donde se observa que Ichupampa, Yanque y Achoma presentaron mayores daños.

El inventario post sismo realizado por el Indeci muestra que las localidades más afectadas (> número de viviendas colapsadas) se ubican en zonas de coloración roja (aceleración alta), guardando coherencia el modelo con lo observado durante la evaluación de campo. En conclusión, las localidades de Yanque e Ichupampa, las más próximas a la falla, muestran daños mayores en

comparación con las localidades de Maca y Pinchollo, donde los daños fueron mínimos.

Benavente et al. (2016), utilizaron este tipo de modelo, teniendo en cuenta las magnitudes máximas posibles (>6.5), para más fallas del valle del Colca y de la región Arequipa.

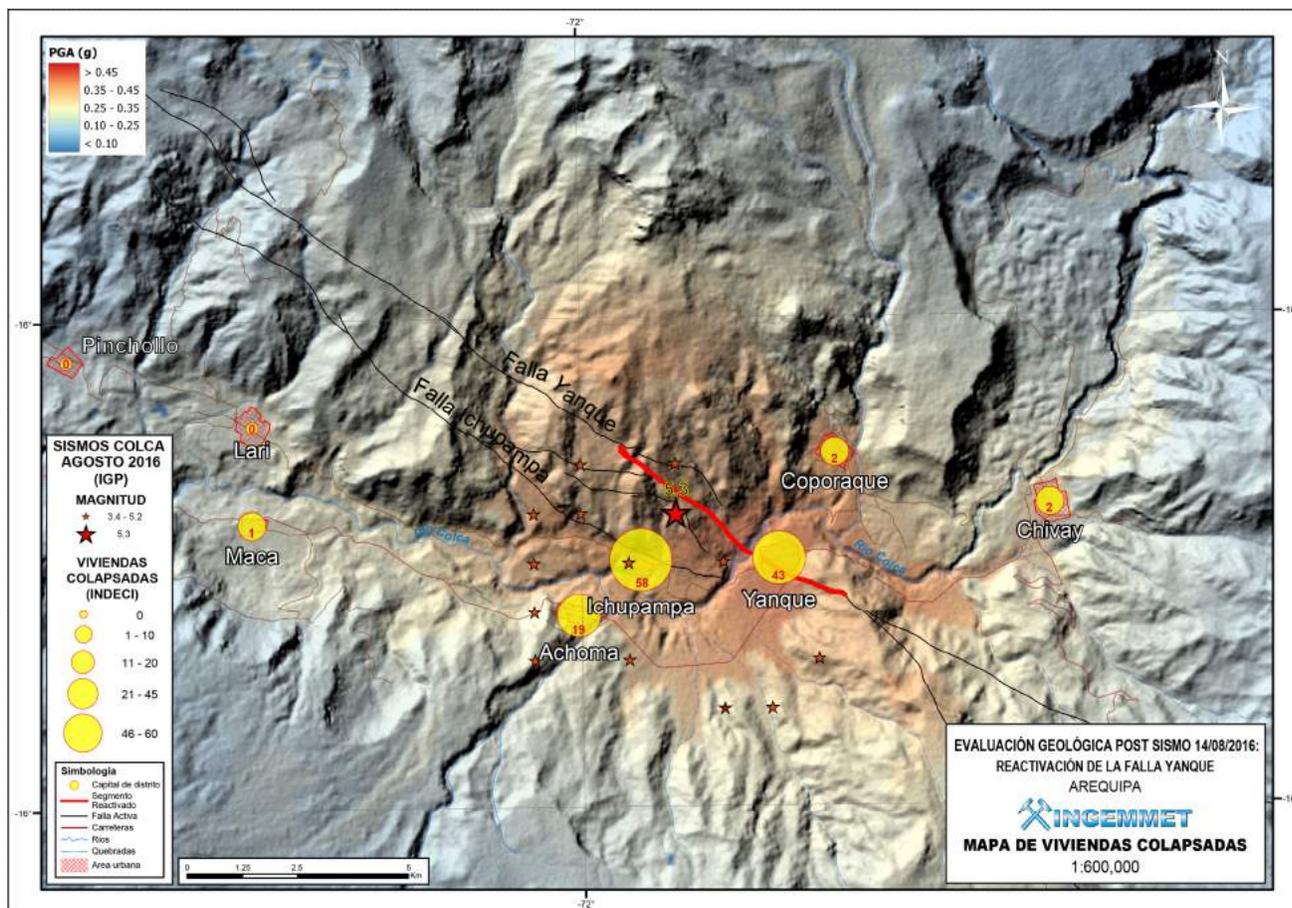


Figura 15. Mapa de distribución de viviendas colapsadas en el Valle del Colca, producto del sismo del 14/08/2016.

### 4.3. Descripción de daños por Localidades

Las localidades que registraron más daños fueron Ichupampa, Yanque y Achoma

#### 4.3.1. Localidad de Ichupampa

La localidad de Ichupampa es uno de los poblados más afectados por el sismo del 14 de agosto, el segmento reactivado de la falla y el epicentro se encuentran cerca al poblado (Figura 15). La localidad de Ichupampa se emplazó sobre depósitos lacustres (Formación Colca) y coluviales, en la Figura 8 se tiene la ubicación de movimientos en masa que se encuentran alrededor de la localidad de Ichupampa.

Los daños ocasionados por la reactivación de la Falla Yanque fueron: viviendas colapsadas, deslizamiento, derrumbes, caídas de rocas y agrietamientos en el terreno, determinados por la relación amplificación de onda, tipo de suelo y tipo de construcción (Fotos 5 y 6).



Foto 5. Daños en la iglesia destruida, los campanarios de la iglesia colapsados por efectos del movimiento sísmico.



**Foto 6.** Vivienda colapsada por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción.

#### 4.3.2. Localidad de Yanque

La localidad de Yanque es el segundo poblado más afectado por el sismo del 14 de agosto, debido a que el segmento reactivado de la falla cruza por la ciudad y el epicentro se encuentran cerca (Figura 15). La localidad de Yanque está emplazada sobre depósitos lacustres (Formación Colca), este tipo de depósitos inconsolidados permiten que las ondas sísmicas se amplifiquen ocasionando mayor vibración en el terreno y por ende el colapso de viviendas y la generación de movimientos en masa.

Los daños ocasionados por la reactivación de la Falla Yanque y el posterior sismo fueron: viviendas colapsadas, deslizamiento, derrumbes, caídas de rocas y agrietamientos en el terreno, determinados por la relación amplificación de onda, tipo de suelo y tipo de construcción (Fotos 7 y 8). También ocasiono la muerte de tres personas.



**Foto 7.** Vivienda afectada, los muros están agrietados por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de material, es considerada una vivienda inhabitable.



**Foto 8.** Canal destruido por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción.

#### 4.3.3. Localidad de Achoma

La localidad de Achoma es el tercer poblado más afectado por el sismo del 14 de agosto, el segmento reactivado de la falla se encuentra cerca (Figura 15). La localidad de Achoma está emplazada sobre depósitos coluviales y aluviales, en la Figura 8 se tiene la ubicación de movimientos en masa que se encuentran alrededor de la localidad de Achoma.

Los daños ocasionados por la reactivación de la Falla Yanque y el posterior sismo fueron: viviendas colapsadas, deslizamiento, derrumbes y caída de rocas en la carretera (Fotos 9 y 10), estos procesos se generaron por la amplificación de onda, tipo de suelo y tipo de construcción. También ocasiono la muerte de una persona.



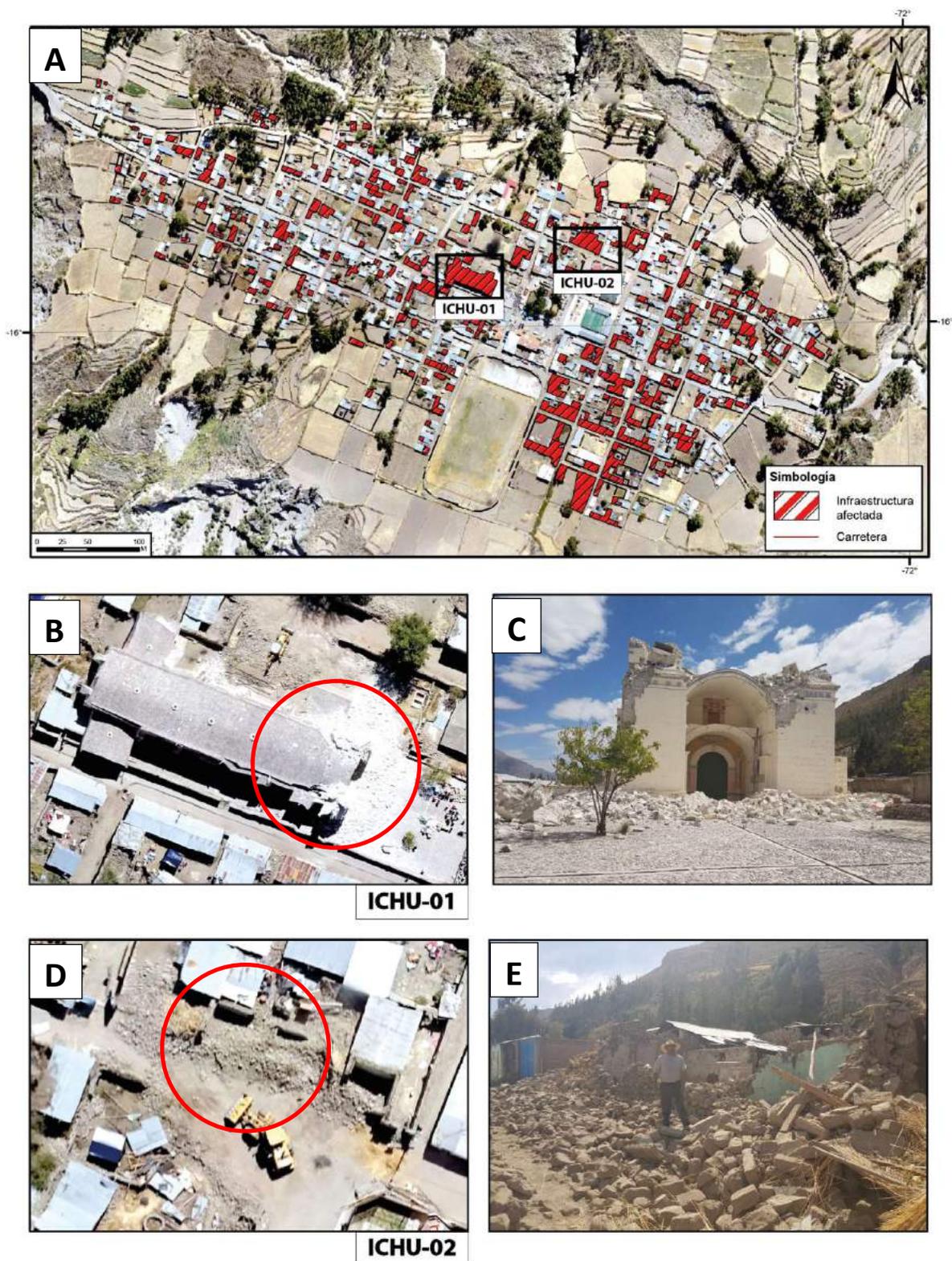
**Foto 9.** Vivienda colapsada por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción.



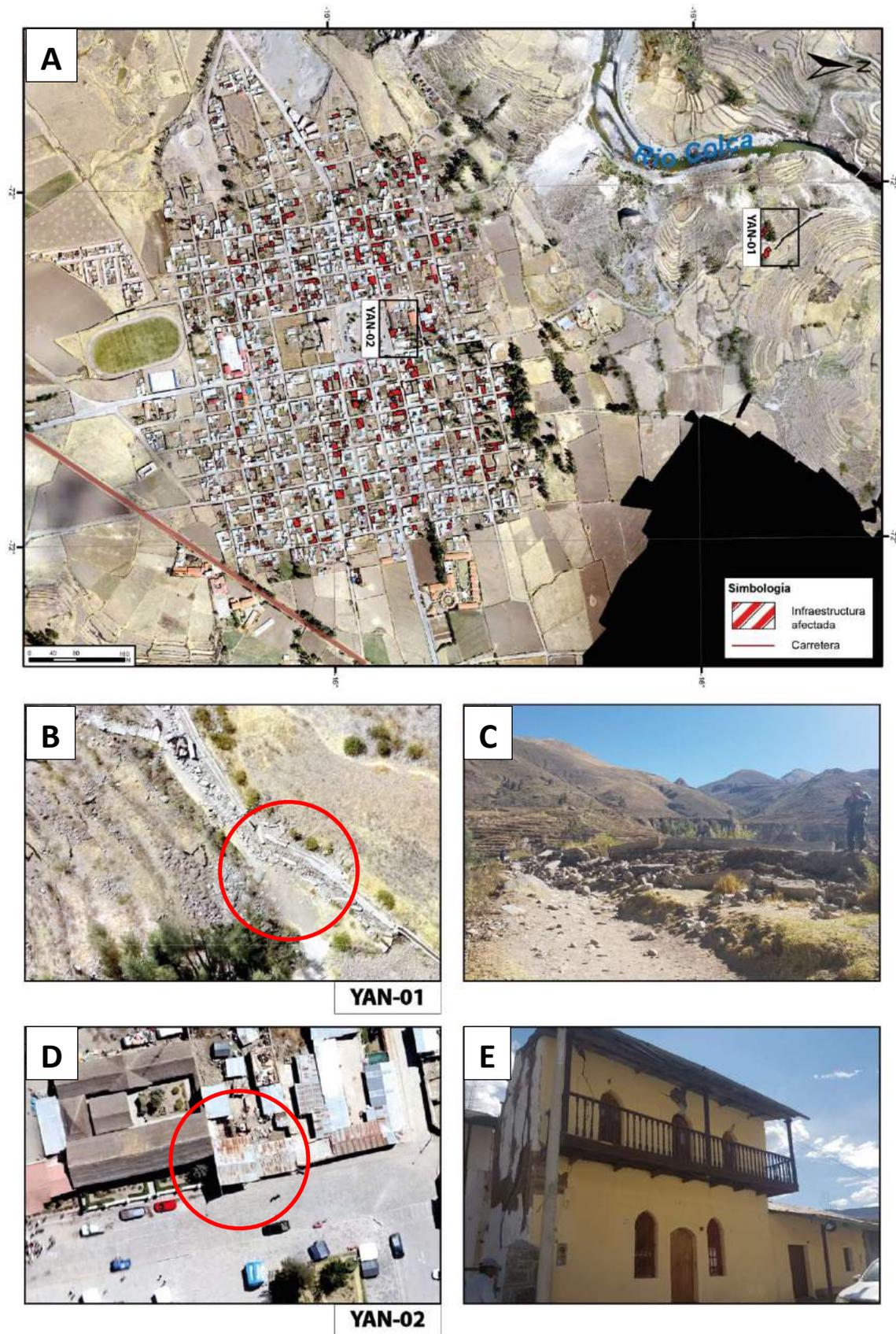
**Foto 10.** Muros colapsados por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción, nótese la vivienda de material noble que no sufrió mayor daño.

Se realizó una serie de sobrevuelos utilizando el Drone *eBee sensefly* sobre los poblados afectados de Ichupampa, Yanque y Achoma con motivo de registrar los daños en las

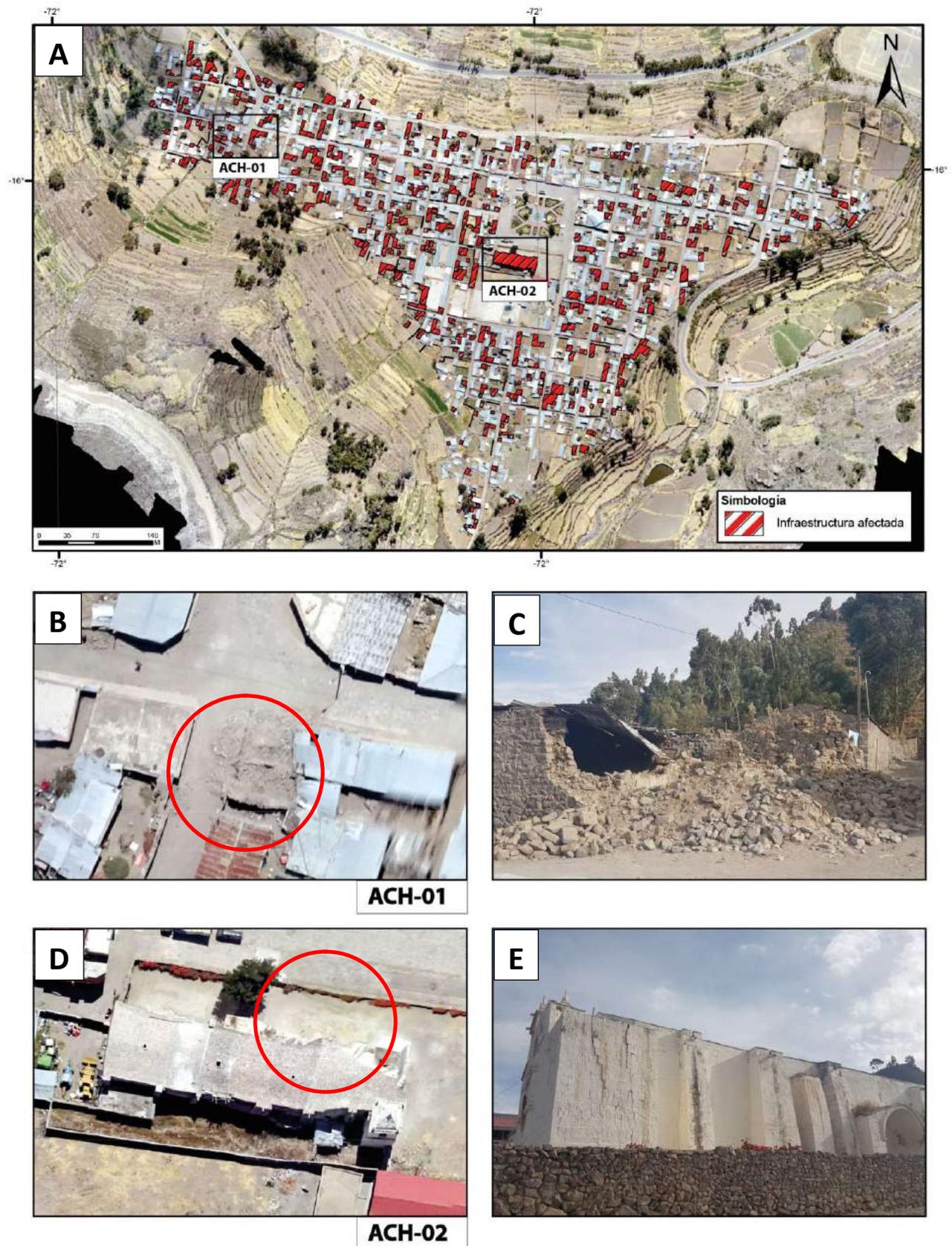
viviendas provocado por el sismo (Figuras 16, 17, 18), la resolución de la ortofoto por pixel es de 7 cm, resolución que permitió evaluar los daños.



**Figura 16.** A) Registro aéreo de viviendas dañadas en Ichupampa por efecto del sismo del 14/08/2016, los polígonos en rojo muestran la infraestructura afectada; B) Detalle de la iglesia de Ichupampa; C) Fotografía de campo de la iglesia de Ichupampa; D) Detalle de imagen aérea de viviendas afectadas al norte la plaza principal de Ichupampa, donde se observa los muros colapsados; E) Fotografía de campo de las viviendas mostradas en la Figura D.



**Figura 17.** A) Registro aéreo de viviendas dañadas en Ichupampa por efecto del sismo del 14/08/2016, los polígonos en rojo muestran la infraestructura afectada; B) Detalle del canal de Yanque; C) Fotografía de campo del canal de Yanque; D) Detalle de imagen aérea de viviendas afectadas en la plaza principal de Yanque, donde se observa los muros agrietados; E) Fotografía de campo de una de las viviendas mostrada en la Figura D.



**Figura 18.** A) Registro aéreo de viviendas dañadas en Achoma por efecto del sismo del 14/08/2016, los polígonos en rojo muestran la infraestructura afectada; B) Detalle de imagen aérea de viviendas afectadas al Ingreso de Achoma, donde se observa los muros colapsados; C) Fotografía de campo de la vivienda mostrada en la figura C; D) Detalle de la iglesia de Achoma; E) Fotografía de campo de la iglesia de Achoma con facturas en los muros.



Así mismo, en el Valle del Colca se presenta un número importante de fallas geológicas activas, tanto en la margen derecha como en la izquierda, que le dan la condición de ser una zona de intensa actividad sísmica, misma que se evidencia en el registro geológico-estratigráfico (Figura 19), además se han encontrado escarpes de más de 30m como es el caso de las fallas Trigal y Solarpampa (Sebrier et al., 1985), que permite afirmar que en el valle del Colca pueden ocurrir eventos con una magnitud máxima de hasta 7 Mw.

## 6. Conclusiones

El sismo del 14 de agosto fue producto de la reactivación de la Falla Yanque (zona de fallas del Colca) que por sus características morfológicas, geométricas y cinemáticas se determinó que es una estructura geológica **activa (falla)**, donde el sismo mencionado confirmó su actividad.

En observaciones de campo y cartografiado post-sismo no se evidencia ruptura superficial primaria, pero si se observan grietas cosísmicas alineadas y localizadas a lo largo y alrededor del segmento reactivado.

En el estudio "Evaluación del Relieve, Neotectónica y Peligro Sísmico en la Región Arequipa", realizado por INGEMMET, mediante la metodología expuesta en el mismo, se logró generar mapas de amenaza sísmica para movimientos en masa y procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos (Anexo I). Verificando, el sismo, lo expresado en el estudio.

Los efectos cosísmicos (desprendimientos de rocas, derrumbes, deslizamientos, grietas en el terreno y otros) en el área de influencia, del sismo del 14 de agosto, han afectado las vías de comunicación (carreteras y caminos vecinales), terrenos de cultivo y viviendas. Cabe mencionar que los derrumbes, deslizamientos y caídas de rocas se han producido principalmente en los taludes carreteros.

Las localidades de Ichupampa, Yanque y Achoma son los poblados más afectados, debido a que el segmento reactivado y el epicentro del sismo se encuentran muy cerca a estas poblaciones.

El valle del Colca se considera como Zona Crítica por peligros geológicos detonados por eventos sísmicos (reactivación de fallas geológicas) y climáticos.

Los suelos en todo el valle yacen sobre depósitos no consolidados, que por sus características geotécnicas amplifican las ondas sísmicas dando lugar a una mayor vibración en superficie que al generar el reacomodo de partículas ocasiona hundimientos, asentamientos, colapso de viviendas y en zonas donde la napa freática es superficial puede producirse licuefacción de suelos.

Los daños en viviendas se deben principalmente a que no han sido diseñadas y construidas profesionalmente (antigüedad de las mismas); dando como resultado viviendas vulnerables frente a sismos. No se contempla, tampoco, el tipo de suelo donde se asienta la vivienda. Esto es corroborado por viviendas e infraestructura, construidas con material noble, siguiendo las normas de construcción pertinentes, al no sufrir daños significativos.

## Referencias

- Antayhua, Y., Tavera, H., Bernal, I. & Aguilar, V. (2002) - Localización hipocentral y características de la fuente de los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998) región del volcán Sabancaya (Arequipa). Sociedad Geológica del Perú, Boletín, n. 93, pp. 63-71.
- Benavente, C et al. (2016, en revisión) Evolución del relieve, Neotectónica y Peligro Sísmico en la Región Arequipa, INGEMMET. Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo Geológico.
- Benavente, C.; Delgado, F. & Audin, L. (2012) - Estratigrafía de las cuencas lacustres Colca y Omate: ejemplos de paleosismicidad y tectónica activa del arco volcánico cuaternario y actual de los Andes centrales del sur del Perú. En: Congreso Peruano de Geología, 16, Lima, 2012. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú 2012, 6 p.
- Benavente, C.; Delgado, F.; Taipei, E.; Audin, L & Pari, W. (2013) - Neotectónica y peligro sísmico en la región Cusco, INGEMMET. Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo Geológico, 55, 245p.
- Benavente, C.; Fidel, L. & Delgado, G.F. (2010) - Evolución estratigráfica y tectónica de la cuenca pleistocena Colca, Cordillera Occidental-sur del Perú. Congreso Peruano de Geología, 15, Cusco, PE, 27 setiembre - 1 octubre 2010, Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú 2010, p. 758-761. Sociedad Geológica del Perú. Publicación Especial.
- David, C. (2007). Deformación actual de ante-arco t del arco del Oroclino de los Andes Centrales. Tesis optar grado de Doctor en Ciencias mención Geología. Pp. 292.
- Delacour, A., Gerbe, M.-C., Thouret, J.-C., Wörner, G. & Paquereau-Lebti, P. (2007) - Magma evolution of Quaternary minor volcanic centres in Southern Peru, Central Andes. Bull. Volcanol. 69, 581-606.
- 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.
- Indeci, 2016. Movimiento Sísmico Afecta a la provincia de Caylloma - Arequipa. Informe de Emergencia N° 624 - 25/08/2016 / COEN - INDECI / 07:00 HORAS (Informe N° 28).
- Kuroiwa, J. (2016). Manual para la reducción del riesgo sísmico de viviendas en el Perú. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Dirección General de Programas y Proyectos en Vivienda y Urbanismo. 110 p.
- Palacios, O; De la Cruz, J; De la Cruz, N; Klinck, B.A.; Ellison, R.A.; Hawkins, M.P. (1993) - Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al Oeste del Lago Titicaca Sur del Perú (Proyecto Integrado del Sur) - Condorama 31-t - [Boletín A 42].
- 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.
- Sébrier, M.; Mercier, J.L.; Mégard, F.; Laubacher, G. & Carey-Gailhardis, E. (1985) - Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in central Andes of Southern Peru: *Tectonics*, 4(7): 739-780.
- Wells, D.L. & Coppersmith, K.J. (1994) - Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974-1002.
- Zavala, B.; Vilchez, M.; & Rosado, M (2008). Zonas críticas por peligros geológicos en la cuenca del río Camaná - Majes-Colca, Primer reporte. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, INGEMMET, 40 p.
- Zavala, B.; Vilchez, M.; Rosado, M.; Pari, W. & Peña, F. (2014). Estudio Geoambiental en la Cuenca del Río Colca, INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 57, 222 p., 11 mapas.