

Informe Técnico N° A6740

# ESTUDIO GEOLÓGICO Y MONITOREO GEODÉSICO EN EL DESLIZAMIENTO DE LARI, AREQUIPA

Distrito Lari  
Provincia Caylloma  
Región Arequipa



POR:

GAEL ARAUJO  
PATRICIO VALDERRAMA  
EDU TAIPE  
RAFAEL MIRANDA

JULIO  
2017

## INDICE:

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>.....3</b>
<b>1. CAPITULO I. ASPECTOS GENERALES</b>	<b>.....4</b>
<b>2. CAPITULO II. GEOLOGÍA REGIONAL</b>	<b>.....7</b>
<b>3. CAPITULO III. GEOLOGÍA DEL DESLIZAMIENTO</b>	<b>.....10</b>
<b>3.1. Unidades geológicas locales</b>	<b>.....10</b>
<b>3.2. Unidades del deslizamiento</b>	<b>.....13</b>
<b>3.3. Descripción de Perfiles</b>	<b>.....19</b>
<b>3.4. Peligrosidad a Movimientos en Masa</b>	<b>.....22</b>
<b>4. CAPITULO IV. DINÁMICA DEL DESLIZAMIENTO</b>	<b>.....24</b>
<b>4.1. Estado del deslizamiento: 1955</b>	<b>.....24</b>
<b>4.2. Estado del deslizamiento: 2013 - 2014</b>	<b>.....26</b>
<b>4.3. Interacción de los deslizamientos de Maca y Lari</b>	<b>.....28</b>
<b>4.4. Infraestructura afectada por el deslizamiento</b>	<b>.....30</b>
<b>5. CAPÍTULO V: MONITOREO GEODÉSICO</b>	<b>.....32</b>
<b>5.1. Instalación de sistemas de monitoreo</b>	<b>.....32</b>
<b>5.1. Monitoreo GPS RTK: Periodo 2015 - 2016s</b>	<b>.....40</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>.....43</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>.....45</b>

## **INTRODUCCIÓN**

El valle del río Colca se encuentra en una de las zonas de más alta actividad geodinámica en Perú. Esto se hace evidente tanto en los procesos exógenos y endógenos: deslizamientos, avalanchas, erosión, caídas de rocas como en los procesos de geodinámica interna: sismos asociados a fallas geológicas activas y erupciones volcánicas.

Los movimientos en masa representan, los fenómenos geológicos que producen más pérdidas materiales y humanas en Perú. Su investigación y monitoreo se inicia a finales del 2015, formando parte importante de estudios de prevención para la Gestión de Riesgo de Desastres, realizados por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) en la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico.

El deslizamiento de Lari corresponde a un movimiento en masa antiguo, reactivado por sectores con deformación observable, año a año, mediante la destrucción de terrenos de cultivos e infraestructura en poblado de Lari.

Mediante el uso de tecnología láser, el INGEMMET inició el monitoreo del deslizamiento de Lari, con el objetivo de conocer el grado de deformación, tasa de movimiento y características del deslizamiento, para colocar a disposición de autoridades y pobladores, datos de movimiento, óptimos para la gestión del territorio y construcción de obras de prevención.

## **CAPITULO I. ASPECTOS GENERALES**

### **1.1.- Ubicación y Accesibilidad**

El deslizamiento Lari se ubica en el distrito de Lari, provincia de Caylloma – Arequipa. En la margen izquierda del río Colca, al sur del poblado Lari, con una elevación de 3296 msnm (figura 1).

Es accesible por carretera que parte de la ciudad de Arequipa con destino a Chivay (capital de la provincia Caylloma) y luego continua por la margen derecha del valle del río Colca por 18 Km con dirección a Ichupampa. También, se puede llegar, por la carretera Chivay-Maca de 24.3 Km, la que va por la margen izquierda del río Colca, luego de atravesar el túnel en C° Blanco (Maca) se cruza hacia la margen derecha del valle del Colca.

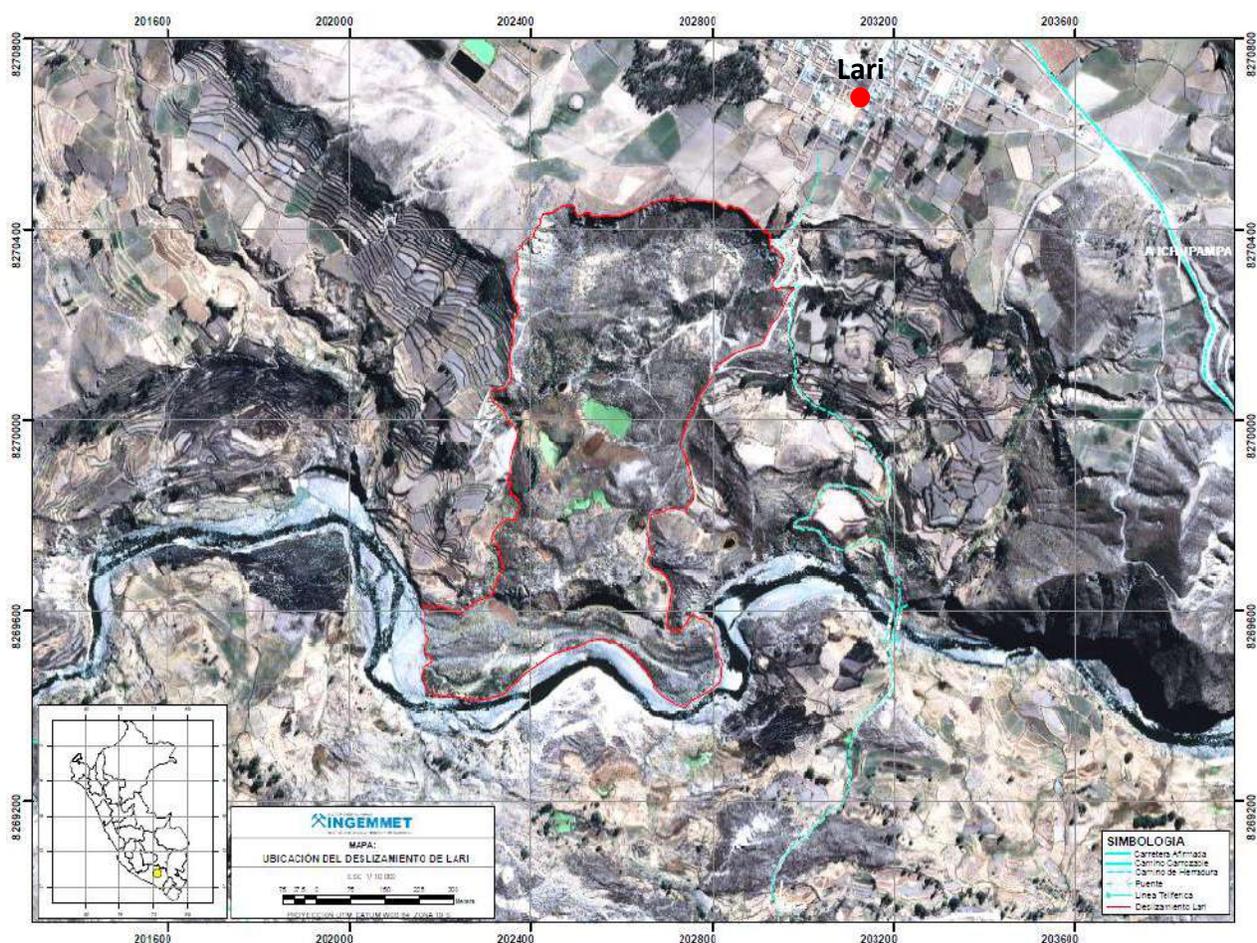


Figura 1: Ubicación del Deslizamiento y poblado Lari, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa

## 1.2.- Clima

Según la clasificación climática de SENAMHI, el área de estudio tiene un clima semiseco a frío (Figura 2). El periodo de clima seco comprende los meses de abril a

noviembre (otoño e invierno Austral), con humedad relativa baja y temperaturas máximas de 16°C (60°F) y temperaturas mínimas de 3°C (37°F). El periodo lluvioso corresponde a meses de diciembre a marzo (verano Austral) (SENAMHI, 2010).

### **1.3.- Demografía**

La información del INEI, muestra que la población de la provincia de Caylloma, para el 2014, era de 91 603 habitantes. Considerando un incremento estadístico de 3 000 habitantes por año, el distrito de Lari cuenta con el 16.6% del total de la población existente en la provincia de Caylloma (1 522 habitantes).

### **1.4.- Antecedentes del deslizamiento**

En marzo de 1963, ocurrió un deslizamiento en las faldas del cerro Quehuisa, a 10 Km. de Madrigal. El cuerpo de la zona deslizada tiene forma de abanico con una superficie de 4000 m<sup>2</sup>. Produjo un flujo de detritos (huaico) que causó la destrucción de 3 hectáreas de terrenos de cultivos y pérdidas de ganado estimándose pérdidas económicas de S/ 30 000 para las comunidades (García, W., 1963). El detonante de este fenómeno se asoció a una excesiva precipitación pluvial en la zona, lo cual pudo haber, saturado material inestable y provocar el deslizamiento-flujo de detritos que se precipito hacia el río Colca.

En 1979, El poblado de Lari fue afectado por un deslizamiento con escarpa semicircular muy pronunciada. Yanqui en 1983, describió que al noereste de esta escarpa se aprecian rajaduras paralelas en el borde del plano de ruptura y señala que estas podrían ser reactivadas por otro sismo (figura 3).

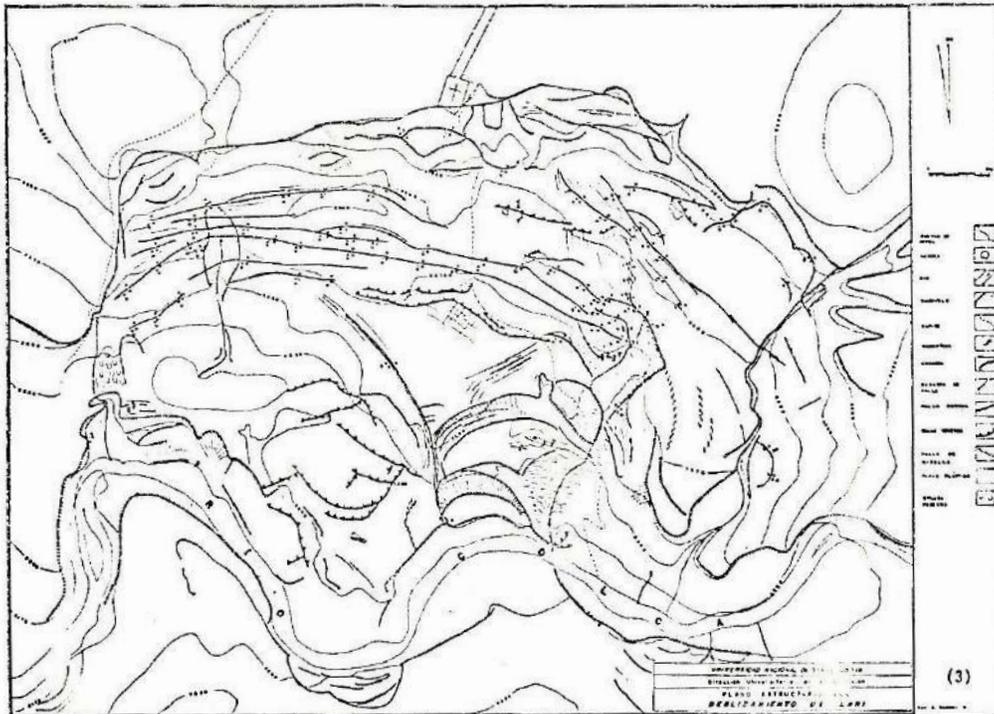


Figura 3: Esquema del deslizamiento de Lari en 1983, se muestra la importante cantidad de escarpas secundarias, grietas y fracturas asociadas al movimiento de la masa. (Yanqui, 1983).

En abril de 1983, una gran masa de suelo, se deslizó en forma lenta y afectó extensas zonas de cultivo, originando una escarpa principal. Yanqui (1983), señala que la zona presentaba abombamientos y depresiones por basculamiento, propios de un deslizamiento rotacional.

En abril de 1987, se realizó el reconocimiento de seguridad física de Madrigal y alrededores. Dávila, reconoce un deslizamiento antiguo de suelos poco coherente y deleznable, con presencia de grietas y derrumbes; Además la comparación de fotografías aéreas de 1955 y 1987, mostró el incremento del número de lagunas (10 a 25 lagunas en un periodo de 32 años).

Otros deslizamientos activos de dinámica retrogresiva y progresiva en el valle del Colca, que tienen relación con materiales geológicos incompetentes son: deslizamientos en el cerro Jatun Orjo, deslizamiento en el sector de Punco (Madrigal), deslizamientos en el sector de Madrigal, derrumbes entre el sector de peña Blanca y las Colca, deslizamiento de Chacaña (Maca), entre otros. (Fidel et al. 1995)

## **CAPITULO II. GEOLOGÍA REGIONAL**

El deslizamiento de Lari, afecta geológicamente rocas de edades (Jurásico Medio a Cuaternarias) (figura 4). Como son depósitos del Grupo Yura y Cuaternarios del Holoceno. La información descrita a continuación fue tomada de Quispesivana *et al.*, 2003.

### **2.1. Grupo Yura:**

El Grupo Yura de edad Jurásico-Cretácicas. Está dividida en cinco subunidades, de las cuales la zona de estudio, está representada básicamente por la Formación Labra.

- Formación Labra (Js- la):

Se ubica al noroeste de Lari, sur de Madrigal, en el borde derecho de la quebrada Sahuayto y en contacto con el Grupo Tacaza y con el complejo volcánico Hualca Hualca. constituida por areniscas cuarzosas gris blanquecinas, cuarcitas y lutitas.

### **2.2. Grupo Tacaza (PN-ta):**

Esta formación aflora a 3 km. al oeste de Lari. Se trata de flujos de lava, secuencias ignimbríticas de composición dacítica o riolítica medianamente fracturadas, de color gris blanquecino y formando las paredes verticales que alcanzan los 200m de espesor; Dentro de este grupo se diferencia la Formación Orcopampa.

- **Formación Orcopampa (PN-or):** Se ubica al este de Chillihua, sur de Lari. Compuesta por rocas de origen volcánico y sedimentario, con estratificación somera, constituida por areniscas, brechas y lavas grises, verdosas y violáceas de composición andesítica.

### **2.3. Formación Hualhuani (Ki-hu):**

Esta formación presenta un espesor aproximado de 300m. Aflora a 3.6 km al sur oeste del poblado de Lari, margen izquierda del río Colca. Está formada por areniscas cuarzosas con intercalaciones de lutitas, presenta buena estratificación con bancos que alcanzan 1 m. de espesor y edades de 150 a 100 Ma (Kinck & Palacios, 1985; Quispesivana & Navarro, 2001).

### **2.4. Formación Colca (P-Co)**

El valle del río Colca es amplio y forma una cuenca de forma elongada, geoforma que fue modelada por geodinámica activa asociada a actividad glaciaria, volcánica y sísmica, permitiendo así la formación de dos lagos que dejaron su registro en la estratigrafía del valle del Colca. Kinck et al. (1986), los depósitos de lutitas y limoarcillitas son conocidos como Formación Colca (Zavala B, 2012).

El poblado de Lari está ubicado en un área donde el valle es más amplio y aflora gran parte de depósitos lacustres. No se conoce la edad exacta de la formación de estos depósitos, pero las secuencias lacustres se hallan debajo de flujos de lava datados cerca de Achoma, estos muestran un registro de 0.61 Ma (Kinck et al., 1986).

### **2.5. Depósitos Aluviales (Qh-al):**

En la zona de estudio, los aluviales son los depósitos más abundantes y representativos a lo largo del valle del Colca, litológicamente está formado por gravas y arenas mal seleccionados en una matriz limoarenosa.

### **2.6. Complejo Volcánico Ananta (NQ-a/an1):**

Está ubicado al sureste de Lari y hacia el sur está en contacto erosivo con el complejo volcánico Jollo Jello.

- **Complejo Volcánico Mismi (Np-cvm/a):** Es un estrato - volcán, ubicado a 4 km. al sur del poblado Lari, constituido por: Tobas no soldadas y lavas andesíticas grises, afiricas en la base y porfiríticas en el techo, cuyas primeras emisiones cubren en discordancia al Grupo Tacaza y a la Formación Sencca, que a su vez son cortadas por domos y afectadas por Iglaciación Pleistocénica.

- **Complejo Volcánico- Hualca Hualca (Qpl-hh/an):** Ubicado al suroeste del poblado de Maca, emplazó extensos y voluminosos flujos de lava de composición andesítica. Contituido por bloques de roca volcánica englobadas por una matriz areno-arcillosa, que actúa como un agente condicionante de remoción de masa y flujos de lava dispuestos en forma subhorizontal. La desestabilización del edificio volcánico hidrotermalizado del Hualca- Hualca, dió lugar también al origen del depósito de avalancha de escombros que aflora 3 km. al oeste de Maca.

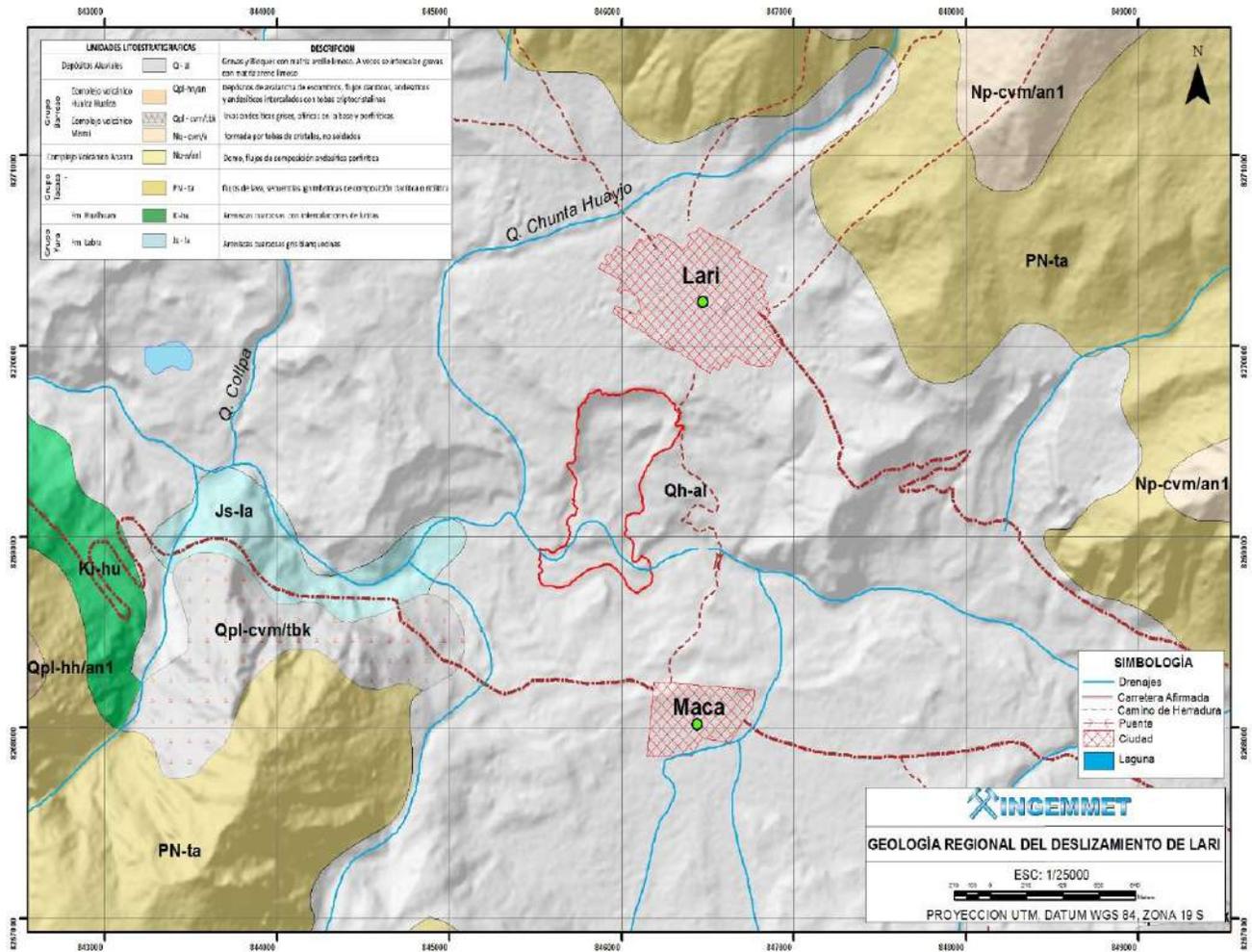


Figura 4: Geología regional del deslizamiento de Lari.

## CAPITULO III. GEOLOGÍA DEL DESLIZAMIENTO

Se presenta el mapa del deslizamiento de Lari a escala detallada (figura 5), En el que se cartografió depósitos superficiales que a continuación se describen:

### 3.1 Unidades geológicas locales

#### - Depósitos Lacustres (Lc)

Corresponden a los depósitos superficiales más predominante del área de estudio, Está ubicado al este del deslizamiento y poblado de Lari, se identifica por tener una topografía prominente respecto a sus alrededores (Foto 1). Corresponde a un nivel lacustrino más antiguo que forma colinas ricas en vegetación silvestre. Está formados por niveles decimétricos de arenas finas bien clasificadas con estratificación plana. En algunas zonas se aprecia figuras sedimentarias tipo *slump* producto de factores externos, se aprecia fallamiento y deformación por factores tectónicos regionales y locales.



Foto 1: Depósito Lacustre (sobre la línea entrecortada) que forma colinas ricas en vegetación silvestre.

Además, se presenta otros bancos de depósitos lacustres al norte del deslizamiento de Lari, sobre los cuales se asienta el poblado y terrenos de cultivo de Lari (Foto 2). Está compuesto de arenas y limos finos a medios bien clasificados subhorizontales (Foto 3) con algunas zonas de deformación por fallas y/o sismos. Su uso es básicamente como terreno de cultivo.



Foto 2: Poblado de Lari que se ubica sobre el depósito lacustre (Lc).



Foto 3: Depósitos lacustres expuestos en la escarpa del deslizamiento de Lari.

- **Depósito Lacustre Estabilizado (Lac-E):** Corresponde al Depósito Lacustre (Lc) pero estabilizado mediante andenería y/o otras obras de prevención de deslizamientos (Foto 4). Esta andenería es muy antigua (época Inca o anterior) y la posibilidad de que ocurra un deslizamiento en esta área es menor.



Foto 4: Depósito lacustre Lc estabilizado por andenerías.

- **Depósito de Avalancha Volcánica (V-A):** Ubicado sobre el Depósito Lacustre (Lc), corresponde a un depósito de avalancha de origen volcánico proveniente del flanco norte del río Colca. Compuesto por bloques de rocas de origen volcánicas heterogéneas, subangulosas a subredondeadas y con matriz cementada también de material volcánico (Foto 5). Se aprecia estructuras tipo *jigsaw* y de cataclasis en los bloques producto del movimiento de la masa. Este depósito se presenta formando un hummock alargado junto a la ciudad de Lari y varios hummocks menores en la escarpa e interior del deslizamiento de Lari.



Foto 5: Depósito de avalancha, sobreyaciendo al depósito lacustre Lc. La línea roja muestra el contacto de las dos unidades.

### 3.2 Unidades del deslizamiento

Corresponden todos los depósitos de remoción en la zona

- **Depósito de Deslizamiento Antiguo- no activo (D-na):** Corresponde a los depósitos de deslizamiento antiguos no activos (Foto 6) o que no presentan una fase de movimiento por lo menos durante los últimos 50 años. Está compuesto principalmente por materiales lacustres antiguos (Lc-A). En algunos sectores de este depósito se encuentran andenerías que lo estabilizan parcialmente (Foto 7).



Foto 6: Deslizamientos antiguos o inactivos cerca de la zona activa mostrados en línea roja entrecortada.



Foto 7: Andenes que estabilizan parcialmente la zona del deslizamiento antiguo.

- **Depósito de Deslizamiento activo (D):** Corresponde propiamente al deslizamiento de Lari (Fotos 8 y 9). Está compuesto mayormente por material lacustre (Lc) y algunos sectores de material residual del depósito de la avalancha volcánica (V-A). El cuerpo del deslizamiento tiene poco más de 1.03 km de largo y 560 m de ancho mayor (a noviembre 2014) y una pendiente aproximada de 13 grados.



Foto 8: Vista noreste del deslizamiento de Lari.



Foto 9: Vista de la parte central y frontal del deslizamiento de Lari, mirando Norte.

- **Zonas de erosión fluvial (FI-e):** Corresponde a las zonas afectadas por la crecida del río Colca (Fotos 10 y 11) que sufren pequeños derrumbes por erosión fluvial, estas áreas son muy limitadas.



Foto 10: Zona de derrumbes ocurridos al Oeste de Lari por erosión lateral del río Colca durante sus crecidas en épocas de lluvia (diciembre-marzo)



Foto 11: Zonas de erosión fluvial al Este del deslizamiento de Lari

- **Depósitos Fluviales:** Correspondientes al canal actual y a los depósitos generados por el río Colca en sus épocas de crecida y expuestos en temporadas de seca (Foto 12). Compuestos mayormente por gravas y arenas. En el cauce del río se aprecia grandes bloques de naturaleza volcánica arrastrados por el río y/o caídas de laderas de ambas márgenes.



Foto 12: Cauce del río Colca, arenas y gravas. Durante la época de crecida el río ocupe íntegramente su canal.

- **Otros depósitos y estructuras:**
- **Lagunas de Infiltración:** Dentro del depósito del deslizamiento de Lari (D) se aprecia varios cuerpos de aguas (Foto 13) producto de la descarga del nivel freático de la parte alta: terrenos de cultivo del poblado de Lari. Estas lagunas son permanentes y juegan un papel importante en la inestabilidad del deslizamiento.



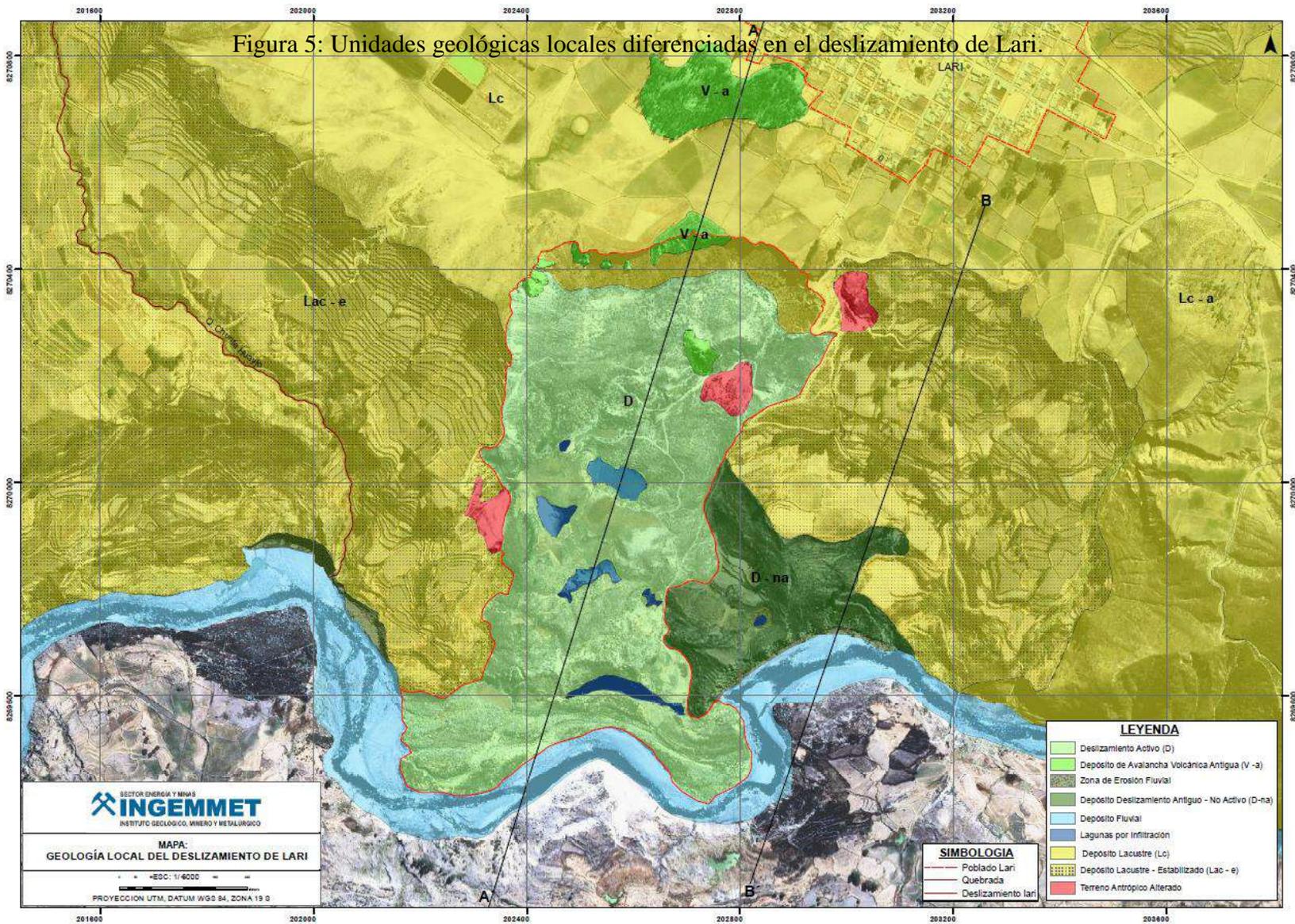
Foto 13: Lagunas de infiltración de aguas dentro del cuerpo del deslizamiento de Lari, estas a su vez siguen para regar los cultivos que se encuentran en el cuerpo del deslizamiento

- **Terreno alterado antrópicamente:** Dentro y en las cercanías del cuerpo del deslizamiento de Lari se encuentran varios sectores alterados antrópicamente. Uno de ellos, afirmado y aplanado por maquinaria pesada con el fin de construir una cancha deportiva (Foto 14), y otros sectores también intervenidos que los pobladores no supieron dar razón para su futuro uso.



Foto 14: Terreno alterado por acción humana dentro del deslizamiento de Lari.

Figura 5: Unidades geológicas locales diferenciadas en el deslizamiento de Lari.



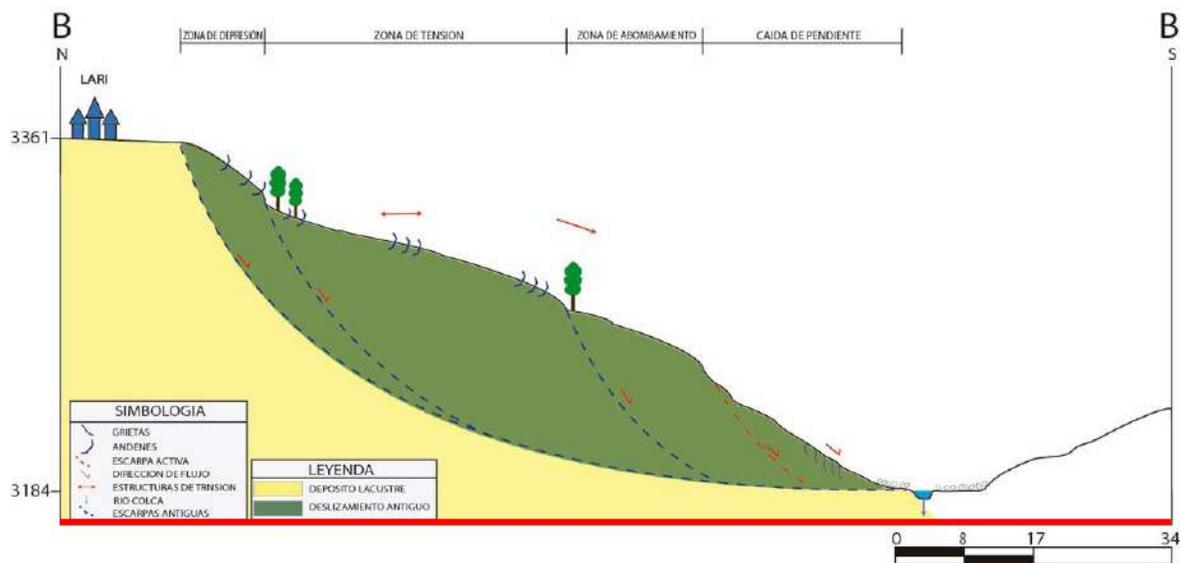
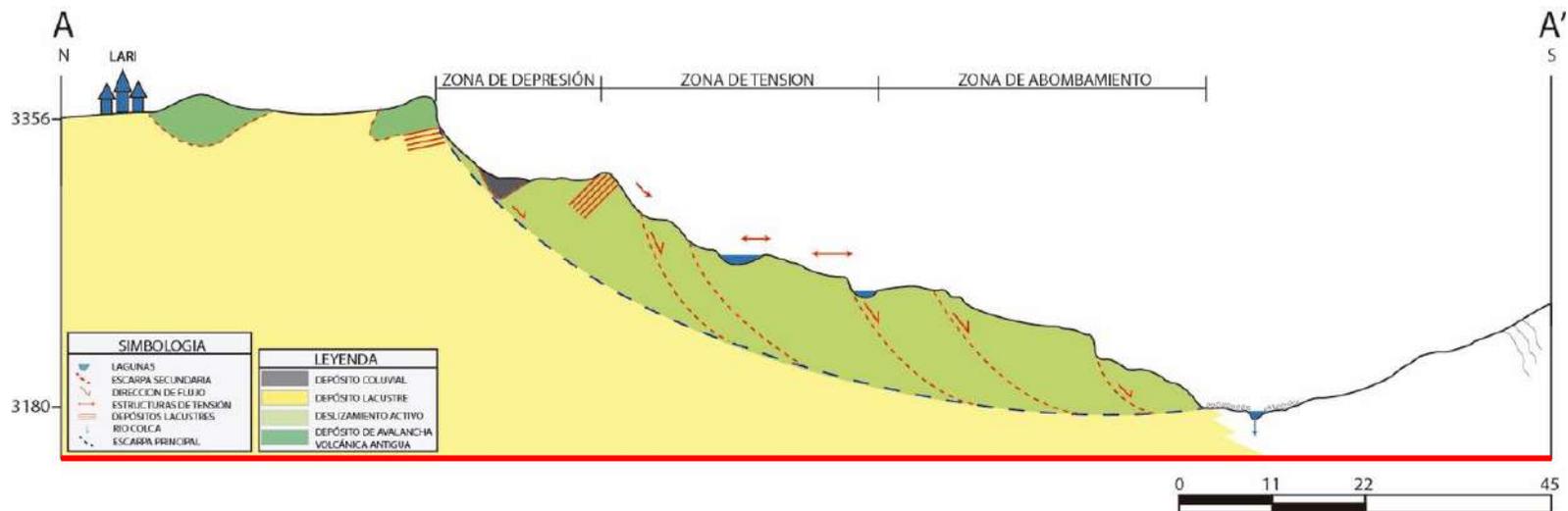


Figura 6: (A-A') Perfil transversal del deslizamiento activo de Lari. (B-B') Perfil transversal del deslizamiento antiguo en Lari.

### 3.3 Descripción de Perfiles:

En la figura 6, el perfil A-A´ representa el deslizamiento rotacional de Lari con una longitud representativa de 1.8 Km. una pendiente de 13 grados, y dirección N-S. En la parte norte se observan los depósitos de la avalancha volcánica antigua, la cual sobreyace a los se encuentra sobre los materiales lacustres observados, geomorfológicamente está dividida en tres partes que representan el deslizamiento activo de Lari:

- **La zona de depresión**, caracterizada por la generación de escarpa o inicio del deslizamiento, el cual a su vez está formado por una pequeña depresión que es cubierta por depósitos coluviales posteriores y esta termina con materiales lacustres estratificados que adoptan una inclinación en dirección preferente al basculamiento de la masa.
- **La zona de tensión**, se caracteriza por la presencia de lagunas de infiltración producto de fuerzas extensivas y agrietamiento, también está formada por escarpas de deslizamiento secundarias
- **La zona de abombamiento**, se caracteriza por la acumulación de material removido en la parte baja del deslizamiento. Su principal característica es un abrupto cambio de pendiente en el depósito debido a la fricción de la masa con el substrato.

El perfil B-B´ representa el deslizamiento rotacional antiguo al Este del deslizamiento de Lari con una longitud representativa de 1.37 Km. y una pendiente de 14.4 grados.

- **La zona de depresión**, constituye la parte de arranque del deslizamiento rotacional, en esta se tiene la presencia de andenería antigua, la cual juega un papel importante en la estabilización de la zona.
- **La zona de tensión**, está determinada por dos escarpas antiguas y a su vez está constituido por andenes y árboles que favorecen a su estabilización. En algunos sectores, esta zona presenta agrietamientos menores posiblemente asociados a fuerzas extensivas.
- **La zona de abombamiento**, se produce saltos causados por la resistencia al movimiento (fricción) que ejerce la masa deslizada y por el brusco cambio de pendiente.

La zona de caída de pendiente es la parte final del cuerpo del deslizamiento y presenta una inclinación muy pronunciada. No se encuentra completamente estabilizada y es afectada por erosión a causa del río Colca.

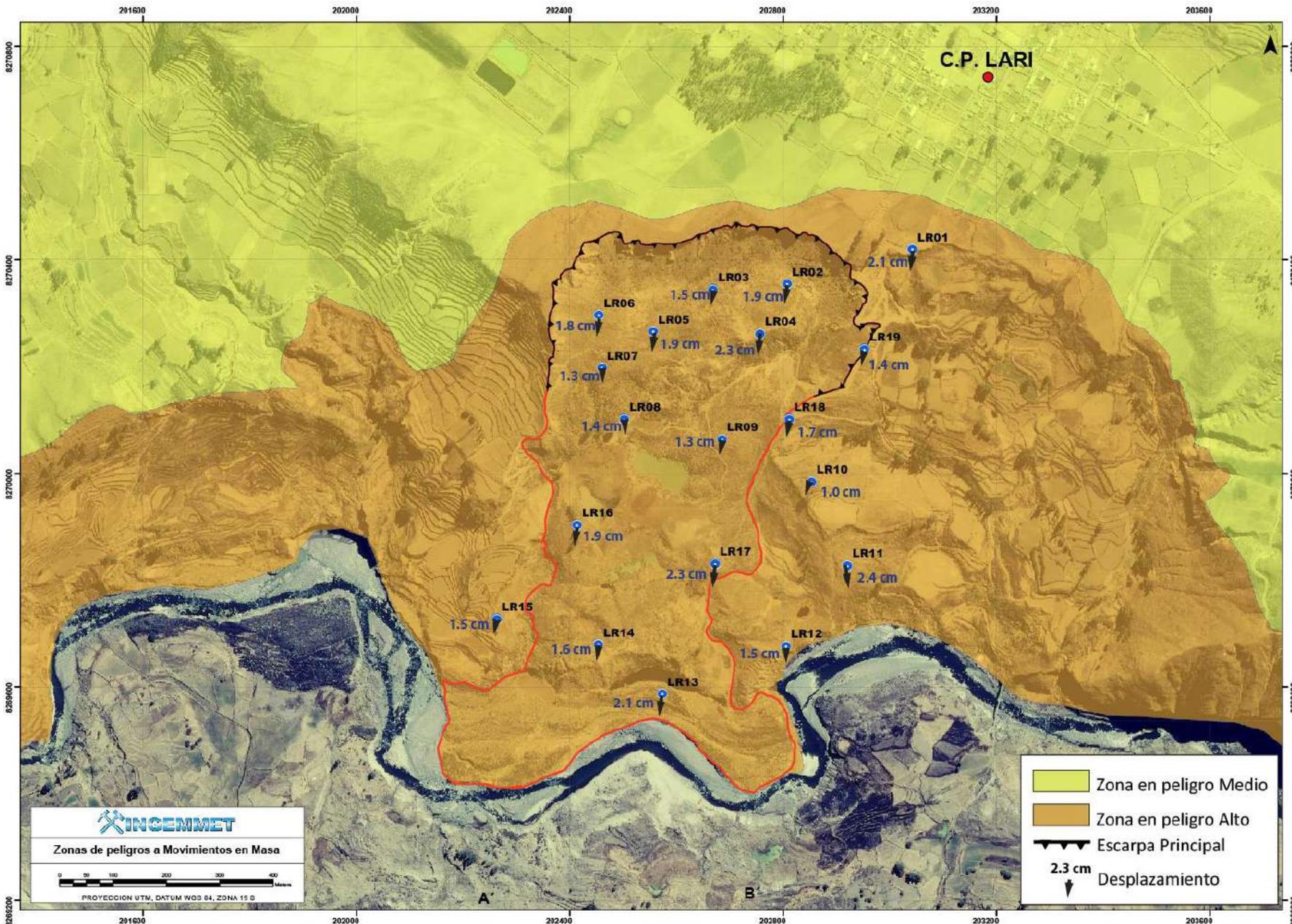
### 3.4 Peligrosidad a movimientos en masa:

El área de estudio, según el grado de peligrosidad a la ocurrencia de movimientos en masa, está dividido en zonas de peligro alto y medio:

ZONA	PELIGRO	CARACTERISTICAS
	<b>Peligro Alto</b>	<p>La zona de peligro alta involucra:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- El cuerpo del deslizamiento de Lari, de superficie ondulada con saltos y escarpas secundarias, muestra una deformación importante, principalmente en épocas de lluvias intensas o movimientos sísmicos. caracterizado por la presencia agrietamientos, desprendimientos de detritos, erosión fluvial lagunas de infiltración (foto 15). Las estaciones de monitoreo han reportado pequeños desplazamientos promedios entre 1 a 2 cm por mes en el cuerpo del deslizamiento, y deformaciones de 0.2 a 1 metros/ año en la escarpa del deslizamiento (ver figura 14).</li><li>- Sectores próximos a la margen del río del Colca.</li></ul>
	<b>Peligro Medio</b>	<p>La zona media involucra el poblado del lari y áreas aledañas al límite del valle Siguas.</p>



Foto 15: Lagunas de infiltración en la parte media e inferior de la masa del cuerpo del deslizamiento de Lari.



## **CAPITULO IV. DINÁMICA DEL DESLIZAMIENTO**

La evolución del deslizamiento de Lari ha sido progresiva a lo largo del tiempo, se tiene registro visual desde 1955 donde se aprecia una marcada deformación superficial. Como se detalla en la sección 1.4, el movimiento del deslizamiento de Lari es más bien lento y progresivo, por lo que no generó pérdidas humanas, pero si cuantiosas de terrenos de cultivo y suelo fértil.

### **4.1 Estado del deslizamiento: 1955**

La imagen aérea ortho-rectificada de 1955 proporcionada por CONIDA muestra una etapa inicial del deslizamiento de Lari. Se ve claramente una escarpa ya bien definida y hasta tres cuerpos que presentan deformación por movimiento ladera abajo (figura 7).

Se puede ver también, la presencia de una laguna de infiltración más grande, así como la perturbación en los andenes de la parte baja (cerca al río Colca) ya abandonados para ese momento.

Pese a que para 1955 la actividad agrícola en la parte alta del deslizamiento era más limitada, debido a que el poblado de Lari era más pequeño y tenía menos habitantes, se asocia la activación – continuación del deslizamiento de Lari a una pequeña quebrada y flujo de agua que inundaba la pampa sobre la cabecera del deslizamiento. Para 1955 el área de terreno afectado por el deslizamiento en Lari es de 305 826 m<sup>2</sup> con un error de +- 25 m.

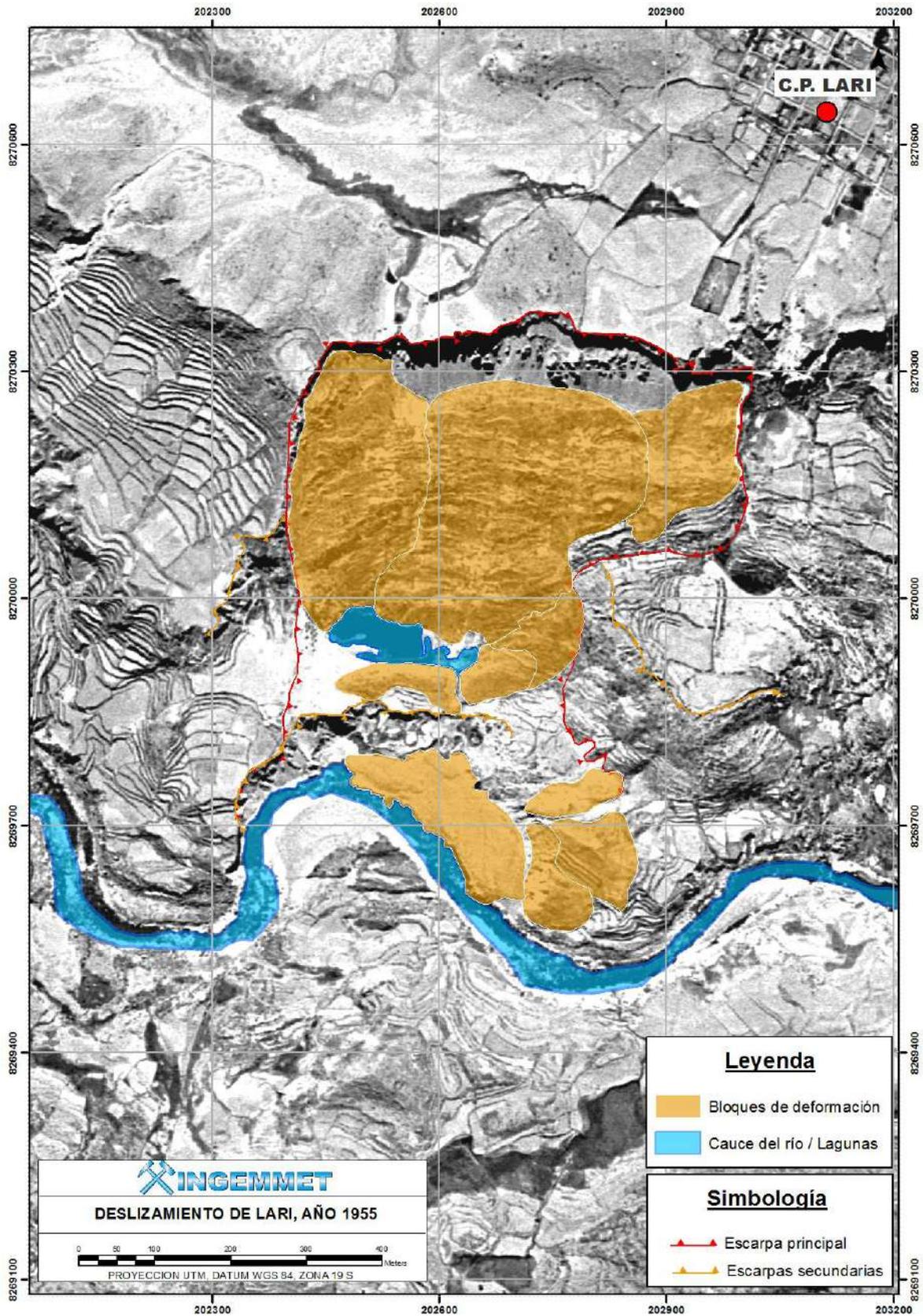


Figura 7: Estado del deslizamiento de Lari, año 1955.

## 4.2 Estado del deslizamiento: 2013 - 2014

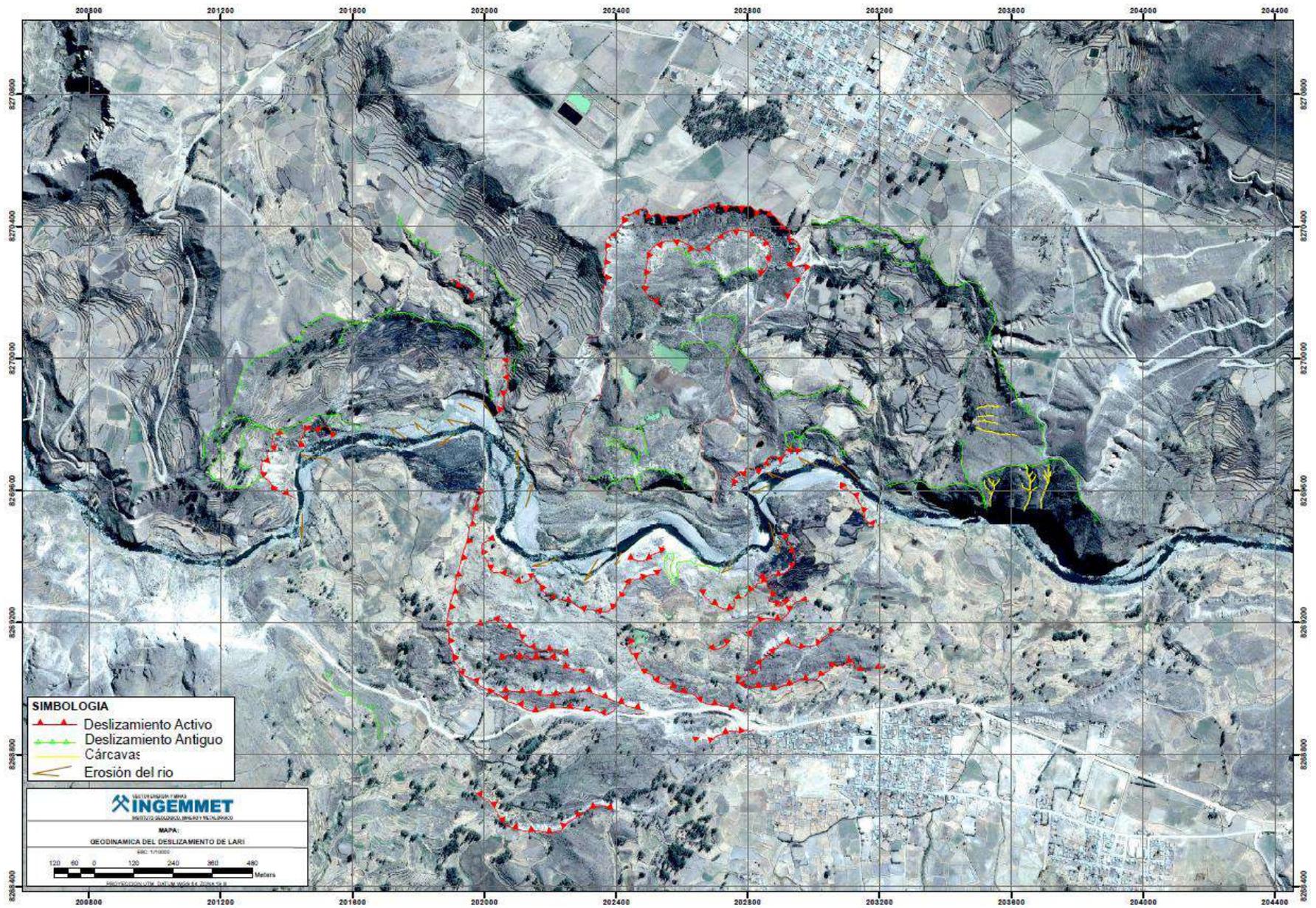
Basados en imágenes de satélite Spot 6, el deslizamiento de Lari muestra una deformación considerable. El aumento de los terrenos de cultivo y el aumento del riego por la expansión de la ciudad de Lari genera la evolución del deslizamiento.

Para el 2013, el área del deslizamiento de Lari es de 475 602 m<sup>2</sup> aumentando en un 55% respecto al área de 1955, eso implica un aumento del área promedio de 1% por año durante los últimos 58 años. Lo que significa que la vulnerabilidad del área incrementa

Actualmente, el deslizamiento de Lari de 937 metros de longitud, con saltos de 21 metros en su escarpa principal, tiene una pendiente promedio de 13° en el cuerpo de deslizamiento (figura 8).

El análisis de imágenes de 1955 y 2013 (58 años) muestra que:

- La escarpa principal del deslizamiento de Siguan, tuvo un comportamiento retrogresivo de 88 metros hacia el poblado de Lari, destruyendo terrenos de cultivo y el cementerio del pueblo. Actualmente este cementerio forma parte del límite de la escarpa.
- El cauce del río Colca varió considerablemente debido al empuje hacia el sur del deslizamiento de Lari lo cual generó erosión lateral en varias zonas ribereñas de la margen izquierda.
- En el 2013, se identificó hasta cinco lagunas de infiltración dentro del cuerpo del deslizamiento, indicando una mayor tasa de deformación en la superficie del cuerpo del deslizamiento y mayor cantidad de agua infiltrada al área vulnerable.
- Actualmente, se aprecian dos juegos de escarpas activas (marcadas de color rojo) y varios sistemas de escarpas no activas (color verde) que podrían reactivarse por el aumento de agua en el cuerpo del deslizamiento y/o sismos locales, que son recurrentes en el área.



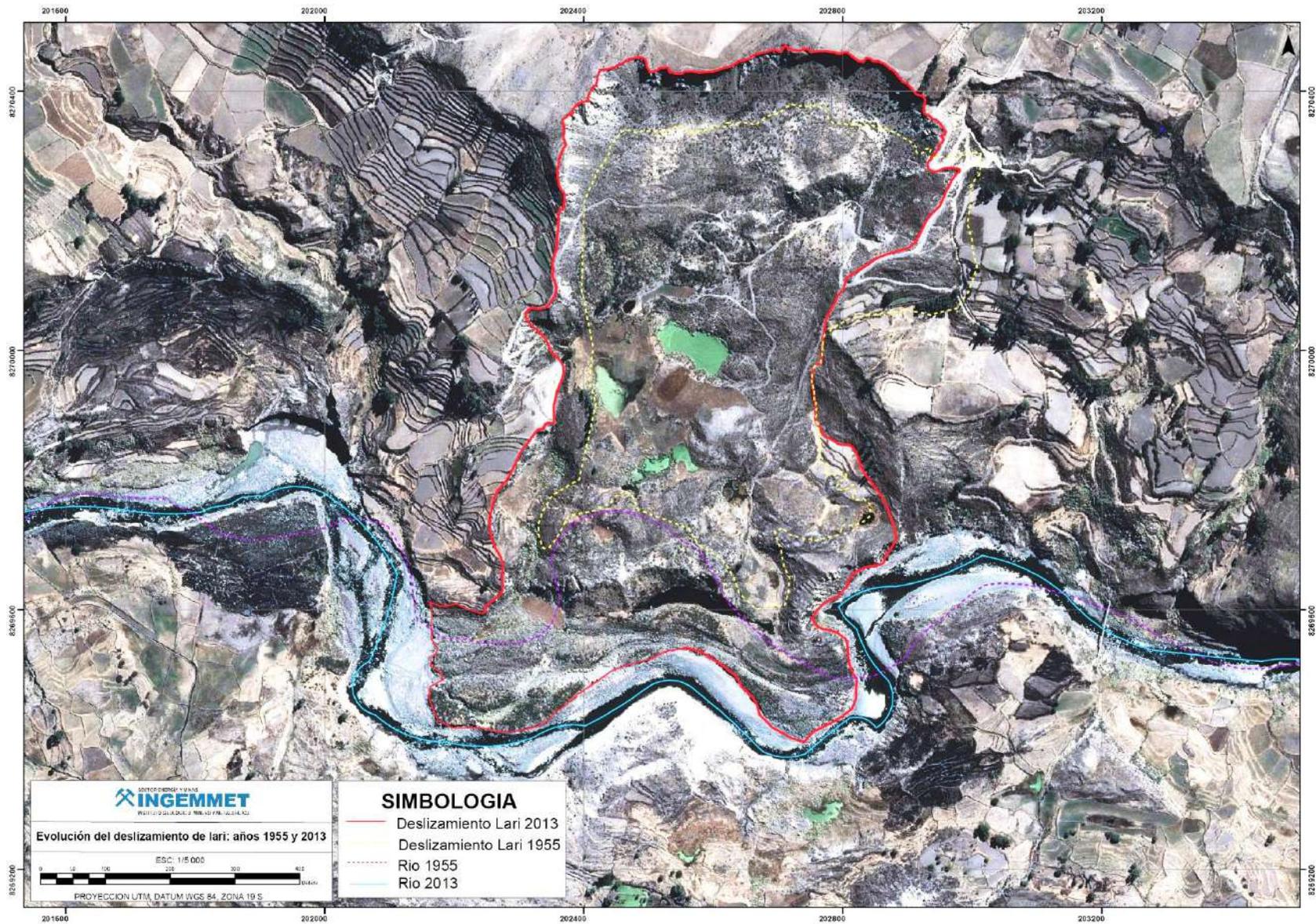
### 4.3.- Interacción de los deslizamientos de Maca y Lari

Uno de los principales movimientos en masa que se encuentra en el Valle del Colca es el Deslizamiento de Maca, un deslizamiento tipo rotacional con avance retrogresivo cuya inestabilidad tiene relación con la incompetencia del material lacustrino y depósitos de avalanchas. El movimiento de este deslizamiento varía entre extremadamente lento a moderado y afecta al poblado de Maca (Foto 15) y la carretera principal del circuito turístico al Cañón del Colca.



Foto 15: Vista del cauce del río Colca hacia el Oeste. Se aprecia en el flanco derecho el material desplazado por el deslizamiento de Lari y en el flanco izquierdo el material desplazado por el deslizamiento de Maca. Nótese como el deslizamiento de Lari produce un cambio brusco en la dirección del canal.

En 1955 el ancho del cauce del río Colca era de 28 metros, mientras que para el 2013 es de 19 metros, indicando un estrangulamiento del canal de 9 metros aproximadamente, lo cual, sumado al desplazamiento total por el empuje de la masa, genera importantes fuerzas erosivas fluviales, en la zona de Maca (figura 9).



La superposición del límite del deslizamiento, en imágenes de satélite de 1955 y 2013 (figura 9), muestran la evolución del deslizamiento en 58 años, donde:

- La línea roja y amarilla representan el límite de la escarpa del deslizamiento en el año 2013 y 1955. Se observa claramente el incremento de la dimensión del deslizamiento principalmente en la parte alta (escarpa retrogresiva del movimiento activo) y parte baja (avance de la masa acumulada y erosión fluvial permanente en el piso de valle).
- La línea celeste y violeta, representa el estado del cauce del río Colca en el 2013 y 1955. El área afectada por el deslizamiento, es el sector que modificó significativamente la forma del cauce del río, desplazándolo hasta 300 metros en dirección sur (hacia el deslizamiento de Maca). Este movimiento se traduce directamente en la desestabilización del flanco izquierdo donde se ubica el poblado y deslizamiento de Maca.

#### **4.4.- Infraestructura afectada por el deslizamiento**

El deslizamiento de Lari afecta directamente estructuras ubicadas en una zona de peligro alto al sur del pueblo de Lari, como terrenos de cultivos y carreteras que actualmente son utilizadas por los pobladores. Algunas zonas dentro del cuerpo del deslizamiento están siendo usadas para ampliar carretera de trocha, botaderos, zonas agrícolas, etc.

Mediante la fotointerpretación de la imagen de 1995 y la comparación con la imagen en la actualidad, se puede determinar que el poblado de Lari ha perdido 62 300 m<sup>2</sup> terrenos de cultivo en los últimos 58 años, a una tasa promedio de 1.074 m<sup>2</sup> por año. Los terrenos que se encuentran al borde la escarpa están siendo afectados por agrietamientos y asentamientos previos a un colapso (Foto 16)

Adicionalmente, el Cementerio Municipal de Lari, que en 1955 se encontraba a 77 metros de la escarpa hoy en día se encuentra al borde de la misma y está siendo afectada por derrumbes constantes (Foto 17).



Foto 16: Agrietamientos y asentamientos en los terrenos al borde izquierdo de la escarpa del deslizamiento de Lari.



Foto 17: Vista del borde del deslizamiento en la zona del Cementerio Municipal, nótese las grandes grietas y aberturas que tiene el terreno

## **CAPÍTULO V: MONITOREO GEODÉSICO**

### **5.1 Instalación del sistema de monitoreo**

A partir del 2014, INGEMMET inició el monitoreo geodésico y de deformación del deslizamiento de Lari utilizando equipos de última generación que consisten en equipos GPS diferenciales y un escáner 3D láser de alta precisión.

El monitoreo geodésico consiste en la instalación (Foto 18) y monumentación (Foto 19) de seis estaciones geodésicas de GPS diferencial en distintas zonas del deslizamiento, para tomar medidas de precisión hasta 4 veces por año y así obtener los vectores de deformación.



Foto 18: Instalación de una estación de GPS diferencial en el cuerpo del deslizamiento de Lari



Foto 19: Monumentación de la primera estación (SL01) para el monitoreo del deslizamiento de Lari

El monitoreo de deformación se realizará con un Scanner 3D de última generación denominado LiDAR (Foto 20). Las ventajas del LiDAR sobre otras técnicas es que se podrá observar zonas que presenten un movimiento menor de 4 cm a escala global, quiere decir, que con esta técnica podremos identificar zonas de deformación que no son aparentes para el ojo humano u otros instrumentos.



Foto 20: LiDAR instalado frente al deslizamiento de Lari, en las primeras tomas de prueba y calibración del equipo.

Durante el 2014 se realizó las primeras medidas de deformación sobre el deslizamiento de Lari, estas medidas servirán como línea base para el monitoreo de la deformación. Se capturó más de 4 millones de puntos que muestran con 3 cm de resolución el estado actual del deslizamiento, de ocurrir alguna variación en el área, por ejemplo, un derrumbe, un movimiento del deslizamiento, durante la siguiente captura de datos será detectado. Ejemplos de este trabajo se ven en las Figuras 9 a las 13.

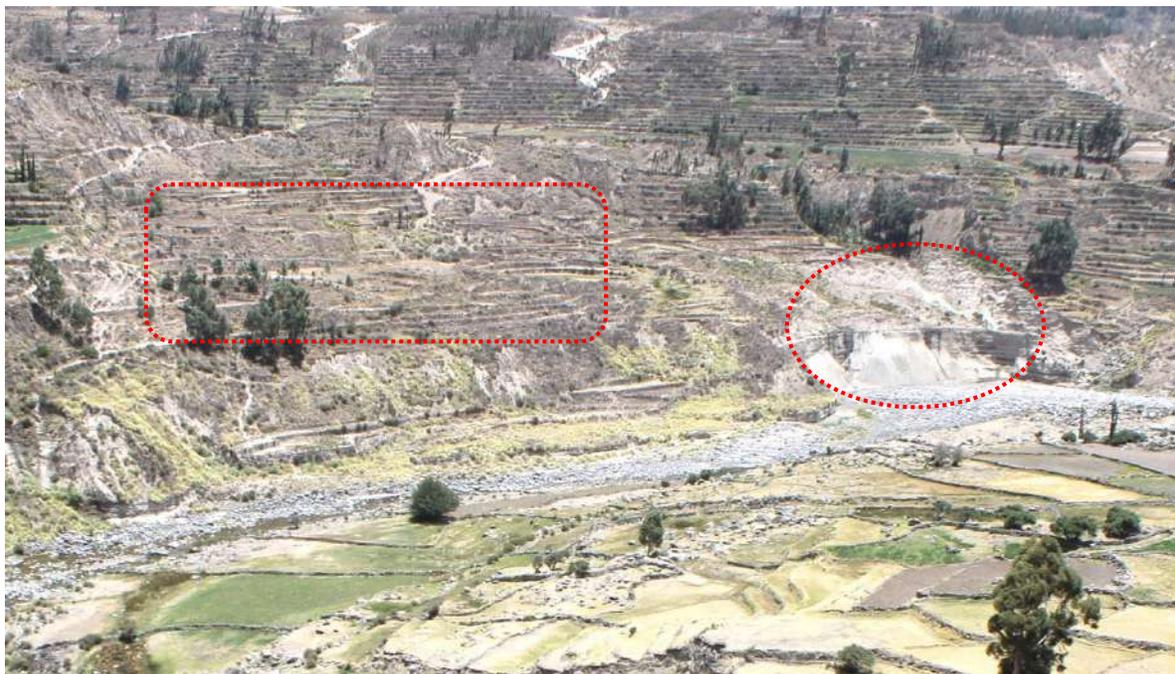
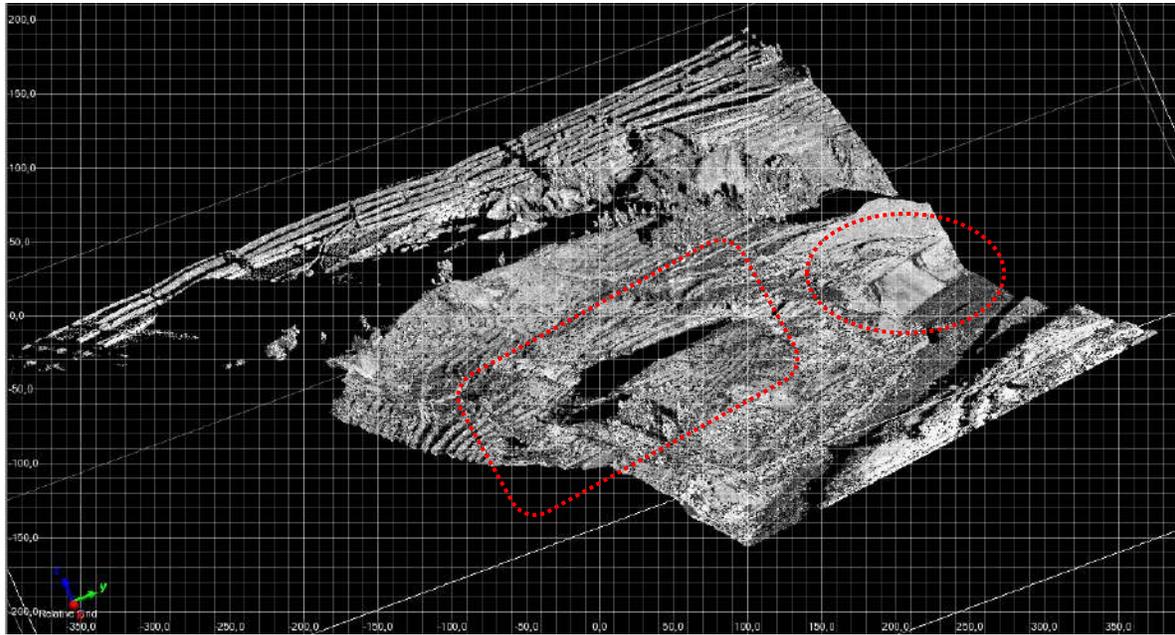


Figura 9: Vista superior: Escaneo LiDAR de parte del deslizamiento de Lari. Vista inferior: Fotografía de campo de la misma zona. El círculo rojo entrecortado muestra un derrumbe producto de la erosión fluvial del río Colca. El rectángulo rojo entrecortado muestra los andenes de la zona.

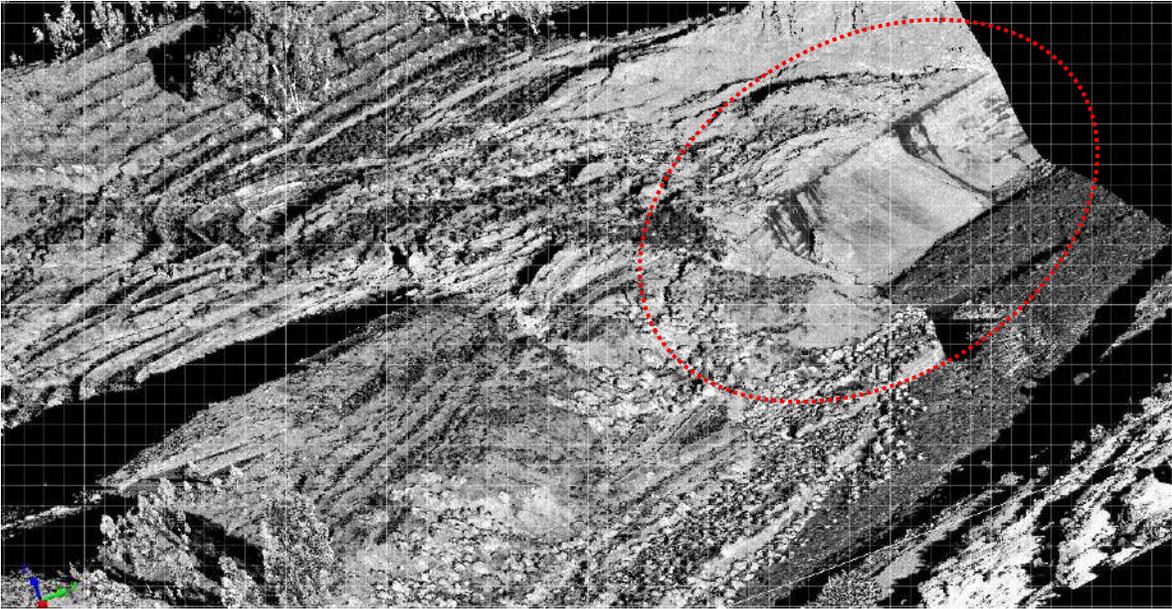


Figura 10: Detalle del derrumbe de la Figura 9. Nótese las zonas de infiltración de agua en la cara libre de la pared y la acumulación de los depósitos coluviales al pie.

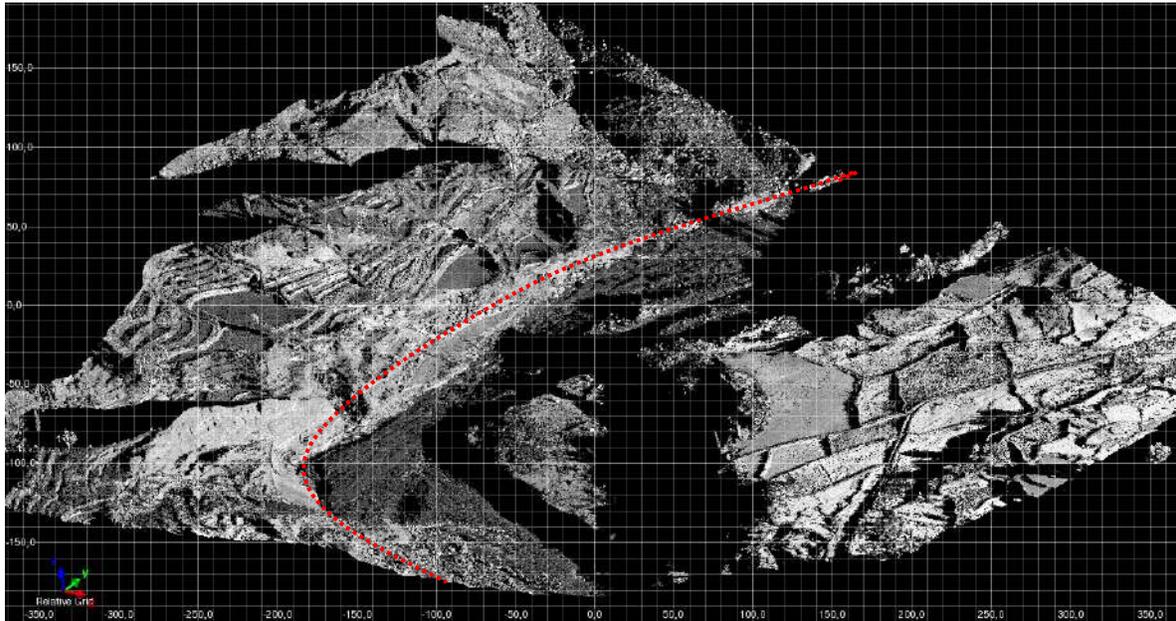


Figura 11: Cauce del río Colca y andenería superior de la zona de Lari. Los terrenos de cultivo en la parte derecha corresponden al poblado de Maca.

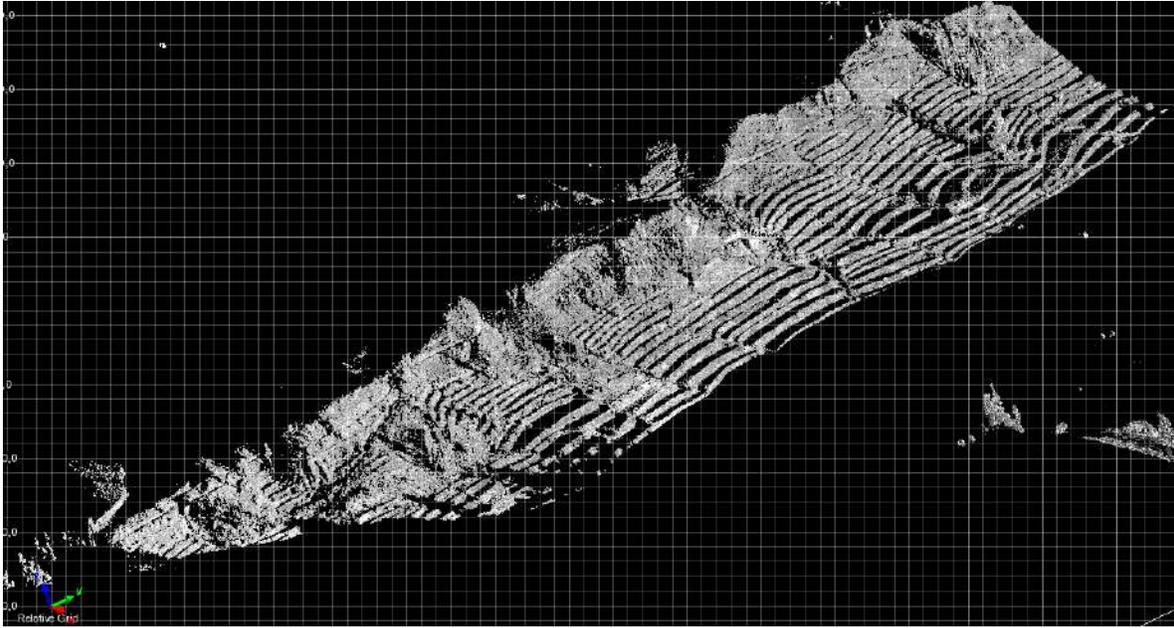


Figura 12: Escaneo LiDAR de los andenes la Oeste de Lari y su comparación con una imagen satelital inclinada actual.

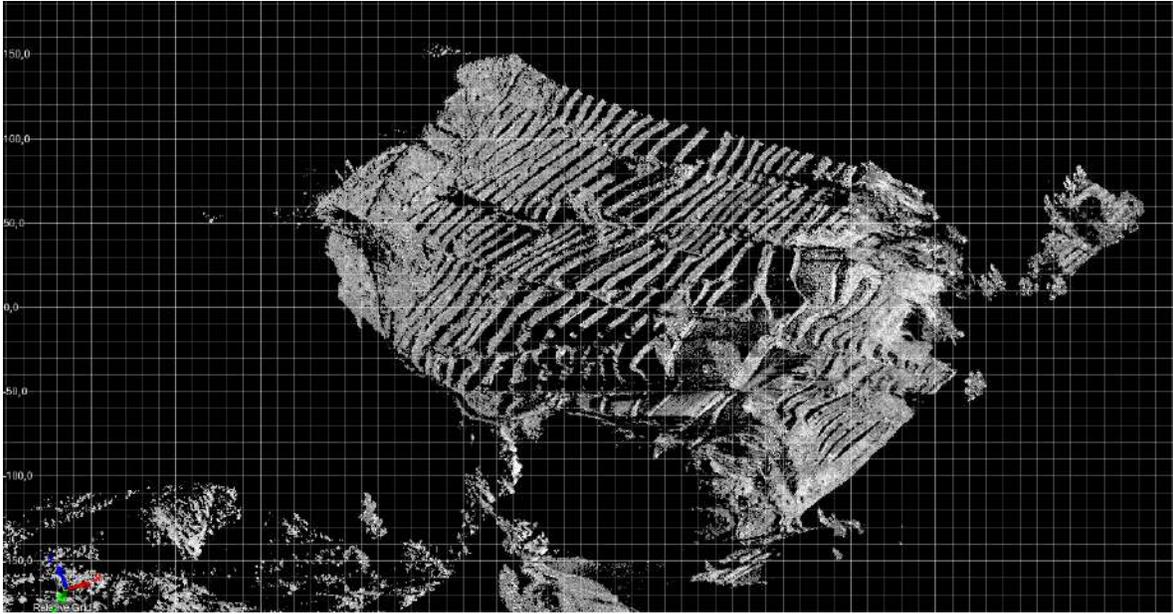


Figura 13: Escaneo LiDAR de los andenes al borde del cuerpo del deslizamiento de Lari y su comparación con una imagen satelital inclinada actual.

De los resultados preliminares del escaneo, se nota la presencia de algunos movimientos en masas antiguos posteriormente estabilizados por andenes (Figura 12) y algunas zonas con andenería que están sufriendo extensión. Estos resultados se confirmarán con escaneos laser periódicos durante los próximos años.

## 5.2 Monitoreo Mediante GPS RTK: Periodo 2015 - 2016

Este método permite monitorear la evolución de la escarpa del deslizamiento respecto a diferentes periodos de tiempo. Obtiene coordenadas en tiempo real RTK (Real Time Kinematic) con precisión milimétrica. Para ello se emplea el método de levantamiento continuo, que tiene como base a la estación GPS permanente MADM ubicado en el extremo oriental del deslizamiento de Maca, para corregir y controlar al receptor móvil que registra datos del deslizamiento, en la tabla 1 se observan las características del equipo.

MARCA	MODELO	MÉTODO	RESULTADO	PRECISIÓN MEDICIÓN	ALCANCE MEDICIÓN
TRIMBLE	R10 GNSS	GPS-RTK	Coordenadas	H: 8 mm +0.5 ppm V: 15 mm +0.5 ppm	>15km

Tabla 1: Características del equipo empleado en el cartografiado de la escarpa principal del deslizamiento de Lari.

### Adquisición y Procesamiento de Datos

Esta etapa corresponde a la adquisición de datos para el levantamiento de la escarpa principal, que permitirá conocer la magnitud del avance del desplazamiento mediante el método GPS-RTK. Se ha calculado y registrado datos para el periodo del 19 de julio al 16 de noviembre del 2016 (Foto 21). Para el procesamiento de los datos GPS-RTK adquiridos en campo se empleó el software Trimble Business Center (TBC) versión 3.5.1, en el Sistema UTM WGS 84, zona 18 Sur.



Foto 21. Levantamiento geodésico de la escarpa del deslizamiento de Lari, mediante el método GPS-RTK.

### **Resultados**

El periodo de inicio del monitoreo geodésico de la escarpa del deslizamiento, con el método de levantamiento GPS RTK, muestra datos de la deformación de la escarpa de Lari desde noviembre del 2015 y junio del 2017. En la figura 14, se puede apreciar una pérdida de terreno entre 0.2 y 1 metros de terrenos de cultivo, en un periodo anual. Movimientos asociados al sismo de Ichupampa en la zona de influencia (con registros de mayor deformación entre julio y noviembre del 2016). En otros sectores de la escarpa, el deslizamiento de Lari no muestra variación alguna durante los años 2015 y 2017. Actualmente el avance de la escarpa compromete directamente terrenos de cultivo y el cementerio de Lari, con un avance de deformación y desplazamiento muy lento.

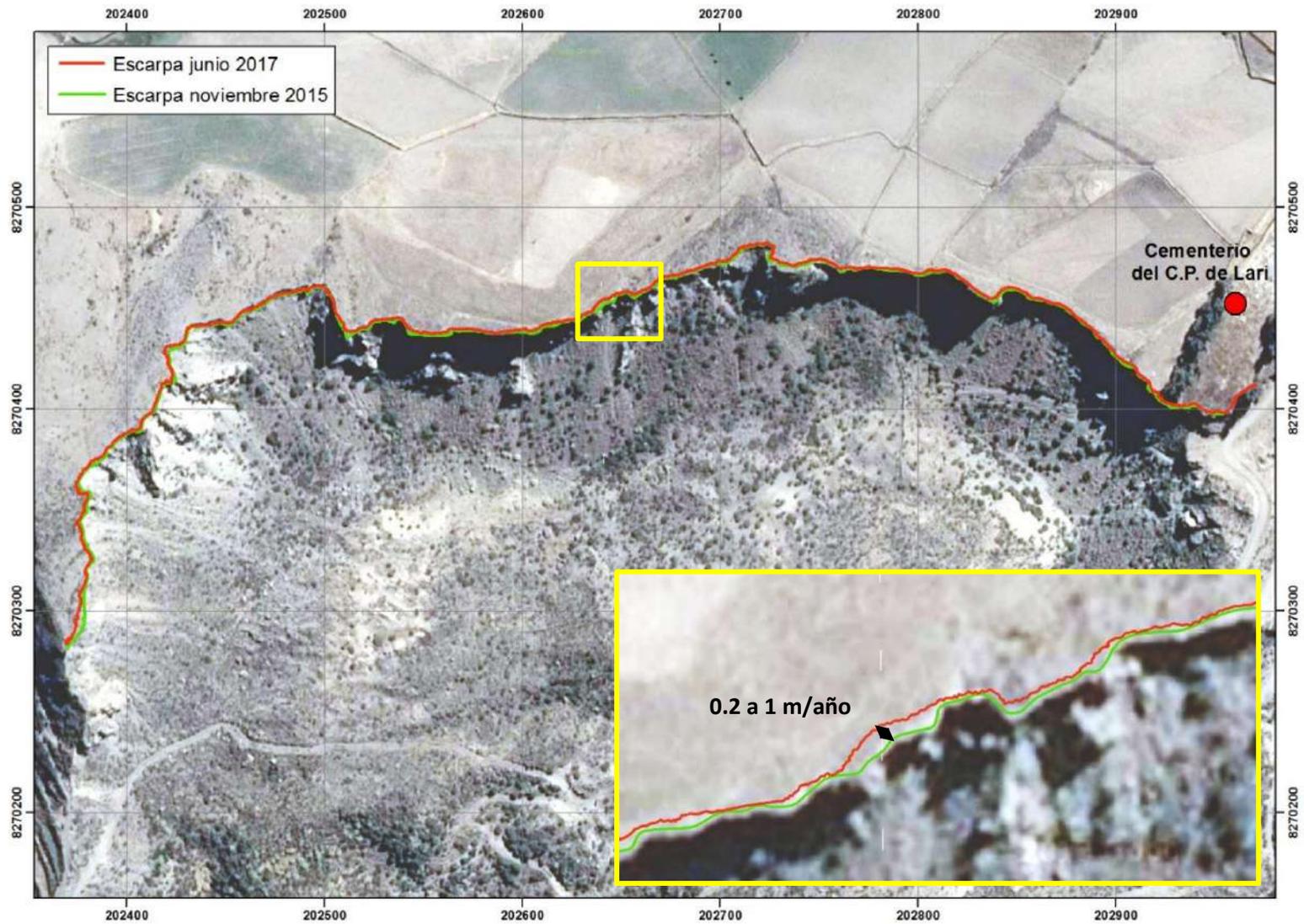


Figura 14. La distancia de deformación entre la escarpa de noviembre del 2015 a junio del 2017 es de 0.2

a 1 metro por año, escarpa de dinámica retrogresiva hacia el centro poblado de Lari.

## CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

- El poblado de Lari, ubicado en la provincia de Caylloma, departamento de Arequipa está siendo afectado por un deslizamiento del tipo rotacional desde mediados del siglo XIX.
- El clima en el distrito de Lari es semi-seco a seco, con una marcada diferencia estacional, una fuerte época de lluvias entre los meses de diciembre a marzo y una temporada de estiaje el resto de año.
- Se tiene reportes de la ocurrencia de deslizamientos en el sector de Lari desde principios de los años 1960 con informes detallados de ocurrencias de asentamientos y derrumbes en 1983, 1987 y 2009.
- Localmente, el deslizamiento de Lari afecta depósitos lacustres que forman una gran planicie. Se observan relictos de avalanchas volcánicas de origen aún desconocidos. Deslizamientos antiguos en la misma zona fueron estabilizados mediante la construcción de andenerías. Existen zonas alteradas por los pobladores dentro del cuerpo del deslizamiento que serán utilizadas para la ampliación de una carretera local y la construcción de un área deportiva.
- El río Colca juega un papel muy importante en la evolución del deslizamiento de Lari, provocando erosión lateral en su base y la subsecuente desestabilización de la parte superior. Además, el empuje del deslizamiento de Lari al río Colca influye en la actividad del deslizamiento de Maca.
- En 1955 ya se observaba deformación superficial en la zona de Lari, con varias zonas de infiltración de agua. Para 1955 la actividad agrícola en la parte alta del deslizamiento era más limitada, debido a que el poblado de Lari era más pequeño y tenía menos habitantes, se asocia la activación – continuación del deslizamiento de Lari a una pequeña quebrada y flujo de agua que inundaba la pampa sobre la cabecera del deslizamiento. En 1955 el área de terreno afectado por el deslizamiento en Lari es 305 826 m<sup>2</sup>
- En la actualidad el cuerpo del deslizamiento de Lari muestra un desplazamiento de 1 a 2 cm por mes. Mientras que el aumento de terrenos de cultivo y riego por inundación son factores importantes para la evolución del deslizamiento. La expansión de la ciudad de Lari es un factor importante en el incremento del riesgo.

- Para el 2013, el área del deslizamiento de Lari era de 475 602 m<sup>2</sup>, 55% más respecto al área de 1955. Implicando un aumento del área promedio de 1% por año durante los últimos 58 años. Actualmente, el deslizamiento de Lari tiene una escarpa de 937 metros de longitud con un salto promedio de 21 metros. Presenta una pendiente promedio de 13 grados en el cuerpo de deslizamiento.
- Dentro del cuerpo del deslizamiento se identificó hasta cinco lagunas de infiltración, indicando la mayor tasa de deformación de la superficie del cuerpo del deslizamiento, y mayor cantidad de agua infiltrada al sistema.
- Mediante la comparación de imágenes de 1955 y 2013 se determina que el poblado de Lari ha perdido 62 300 m<sup>2</sup> de terrenos de cultivo en los últimos 58 años, a una tasa promedio de 1.074 m<sup>2</sup> por año. Los terrenos que se encuentran al borde la escarpa están siendo afectados por agrietamientos y asentamientos previos a un colapso.
- El monitoreo geodésico que realizará INGEMMET consiste en la instalación y monumentación de puntos de control en el cuerpo del deslizamiento, con reiteración periódica de GPS – RTK, para la toma de medidas y obtención de magnitud y dirección de vectores de desplazamiento.
- El monitoreo de deformación se realizará con un Scanner 3D de última generación denominado LiDAR y se podrá observar zonas que presenten un movimiento menor a 4 cm a escala macro, quiere decir, que con esta técnica podremos identificar zonas de deformación que no son aparentes para el ojo humano u otros instrumentos.
- Los resultados preliminares del escaneo LiDAR, muestran movimientos en masas antiguas posteriormente estabilizados por andenes y algunas zonas con andenería que están sufriendo extensión.
- Durante el periodo 2015 – 2016 el deslizamiento de Lari presentó una variación mínima de la forma y longitud de la escarpa, posiblemente asociada a efectos del sismo de Ichupampa.
- La variación de la escarpa es entre 0.2 a 1 metro anual, comprometiendo infraestructura local, como el cementerio (límite de la escarpa principal) y terrenos de influencia del poblado de Lari, sin poner en riesgo vidas humanas.

## **BIBLIOGRAFÍA**

García, W. (1966). Deslizamiento en el cerro Quehuisa en los distritos de Lari y Madrigal. Boletín 13, Comisión Carta Geológica Nacional, Compilación de Estudios Geológicos. p. 88-93.

Yanqui, C. (1983). Geotecnia del deslizamiento de Lari. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, 72, p. 287-299.

Dávila, S. (1987). Inspección de la seguridad Física de Madrigal, Informe Técnico, INGEMMET, Dirección de Geotecnia, 16p

Fidel, L.& Zavala, B. (1995). Estudio geodinámico de la cuenca del río Camaná–Majes (Colca). Boletín Serie C: Gedinámica e Ingeniería Geológica,14, 206 p.

Quispesivana, Q. (2013). Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Caravelí (32-p), Chuquibamba (32-q), Chivay (33-s), Cailloma (31-s), Velille (30-s), Livitaca (29-s) y Pacapausa (30-p). 42 p, INGEMMET

Cuba,F. y Ita, N. (2004). Arequipa. Guía Turística, Senamhi., p. 33-41

Zavala, B. & Vilchez, M. & Rosado, M. Aspectos geodinámicos en los distritos de Lari, Madrigal y Maca (Provincia Cailloma, Región Arequipa), Informe Técnico, INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico.