

Informe Técnico N° A6748

# DINÁMICA Y MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO DE SIGUAS

Región Arequipa  
Provincia Caylloma y Arequipa  
Distrito Majes y San Juan de Sigwas



POR:

GAEL ARAUJO

EDU TAÍPE

RAFAEL MIRANDA

PATRICIO VALDERRAMA

MARZO

2017

# CONTENIDO

1.0	INTRODUCCIÓN	....3
1.1.	OBJETIVO	
1.2	ANTECEDENTES	....4
2.0	ASPECTOS GENERALES	....5
2.1	UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD.	....5
2.2	CONDICIONES CLIMÁTICAS.	....5
3.0	GEOMORFOLOGÍA LOCAL	....8
3.1	VALLE DE SIGUAS	....8
3.2	CONOS DE DEYECCIÓN	....8
3.3	PISO DE VALLE	....8
3.4	RÍO DE SIGUAS	....8
4.0	UNIDADES LITOLÓGICAS	...11
4.1	FORMACIÓN MOQUEGUA (Nmp-Mo)	...11
4.2	DEPÓSITOS ALUVIALES (Q-AI)	...12
4.3	DEPÓSITOS COLUVIALES (Q-Co)	...14
4.4	DEPÓSITOS EÓLICOS (Q-E)	...14
5.0	DINÁMICA DEL DESLIZAMIENTO DE SIGUAS.	...16
5.1	ESTADO DEL DESLIZAMIENTO 2004	...16
5.2	ESTADO DEL DESLIZAMIENTO 2010	...20
5.3	ESTADO DEL DESLIZAMIENTO 2012	...25
5.4	ESTADO DEL DESLIZAMIENTO 2015	...27
6.0	DINÁMICA DE DESPLAZAMIENTO Y DEFORMACION DEL DESLIZAMIENTO DE SIGUAS	...34
6.1	DINÁMICA DE DESPLAZAMIENTO DE BLOQUES	...30
7.2	DINÁMICA DE DEFORMACIÓN DE LA ESCARPA DEL DESLIZAMIENTO	...33
7.0	MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO	...38
7.1	Monitoreo Mediante GPS Diferencial	...33
7.1.1.	Adquisicion De Datos GPS	...41
7.1.2.	Procesamiento	...42
	A) Procesamiento De Datos GPS	...42
	B) Puntos GPS en El Cuerpo Del Deslizamiento	...42
	C) Avance De la Escarpa Principal Con GPS Cinematico	...46
7.1.3.	Resultados De Monitoreo	...47
	A) Dinámica De La Escarpa Principal	...48
	- Dinámica de la Escarpa Principal (Panamericana Sur)	...48
	- Dinámica de la Escarpa Principal (Poblado "El Alto")	...49
7.2.	Monitoreo Con Escáner Lidar	...50
7.3.	Monitoreo Con Imágenes Radar	...51
	Conclusiones	...52
	Recomendaciones	...53
	Referencias Bibliograficas	...54

## 1.0 INTRODUCCIÓN.

El valle del río de Sigwas geomorfológicamente presenta un relieve estrecho con laderas empinadas que asociadas a factores que alteren su estado de equilibrio como la sobresaturación de suelos, gravedad y sismos, favorece la ocurrencia de movimientos en masa

El deslizamiento Sigwas, ubicado al flanco derecho del Valle con el mismo nombre, en la región Arequipa, es un movimiento en masa activo que compromete importante infraestructura: Carretera Panamericana Sur del Km 920+000 al – 921+400, la planta de tratamiento Gloria que es uno de los principales centros de abastecimiento de lácteos del Perú; y hectáreas de terrenos de cultivo del centro poblado de El Pedregal.

La zona de estudio es un deslizamiento rotacional retrogresivo, de geometría semicircular con 1.4 Km de longitud en su escarpa, cuyo desencadenante principal es la sobresaturación de suelos producto del uso inadecuado del sistema de riego del proyecto de Irrigación Agrícola Majes - Sigwas I (Háydee, 2007). Litológicamente, está formada por conglomerados y secuencias volcánicas de la Formación Moquegua (Eoceno – Oligoceno) con depósitos aluviales Pleistocénicos y Cuaternarios que conforman el relleno de la cuenca Moquegua. Estas secuencias tienen como característica principal un alto grado de porosidad.

El análisis detallado de imágenes de satélite y fotografías aéreas muestra la dinámica de la deformación y desplazamiento del deslizamiento Sigwas, evidenciándose una elevación de su tasa de desplazamiento desde el año 2004 hasta la fecha

La masa deslizada tiene un comportamiento dinámico, donde se aprecia estructuras de segregación granular formadas por esfuerzos compresivos así como estriamiento y desplazamientos de bloques de más de 5 metros. En el año 2014 el comportamiento del material generó el represamiento de 250 metros aproximados sobre el río, afectando los terrenos de cultivo en el sector represado.

Frente a la necesidad de monitorear el deslizamiento Sigwas para evaluar la dinámica de deformación y desplazamiento, se establecieron etapas de adquisición de información: La primera etapa consistió en la recopilación de fotografías aéreas históricas pre-deslizamiento y la adquisición de imágenes de satélite para conocer la evolución temporal en los años pasados. La segunda etapa consiste en la construcción y mantenimiento permanente de hitos en la escarpa y cuerpo del deslizamiento que sirven de puntos de control para la obtención de datos de precisión mediante levantamiento de GPS-RTK. La tercera etapa consistió en la construcción de estaciones de monitoreo base para la instalación de un escáner laser de alta precisión (LiDAR) cuya principal ventaja es escanear con una precisión milimétrica estructuras en el cuerpo del deslizamiento.

Con la combinación de estos métodos se calculará los principales parámetros de deformación del deslizamiento como: vectores de desplazamiento, velocidad de extensión de la escarpa, áreas de terreno afectadas, grados de deformación, entre otros.

Estos trabajos se realizan desde el año 2005, en marco de la actividad ACT3: Monitoreo Geofísico y Geodésico de fallas activas y movimientos en masa de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgos – DGAR del INGEMMET.

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo del presente estudio conocer el comportamiento y evolución multitemporal del deslizamiento de Sigwas: sus causas, tasa de deformación, desplazamiento y recurrencia; conocer la vulnerabilidad y (infraestructura en riesgo) y planificar futuros estudios de remediación.

## 1.2 ANTECEDENTES

Previo a los estudios de campo, se recopiló información bibliográfica y trabajos anteriores en la zona, con el fin de conocer que antecedentes se tiene y cómo el conocimiento previo puede aportar a nuestra investigación, las principales referencias al deslizamiento de Sigwas son:

“En el valle de Sigwas, se encontró depósitos con tres prehistóricas depositaciones de volúmenes entre  $15 \times 10^6$  y más de 1000 metros cúbicos, los que no fueron datados, pero se le atribuye edades más viejas que el holoceno, por áreas de cobertura constituidas por depósitos masivos de flujos laharicos del interior de los Andes, que no son conocidos por el pleistoceno tardío /holoceno en esa región. En el mismo valle se produjo mega deslizamientos los pasados 8 años con volúmenes de  $30 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, destruyendo severamente km<sup>2</sup> de agricultura en el valle ...”. Guisado. J. (1966). INGEMMET, 54p.

“En 1981 comenzó la desestabilización del terreno y el agua empezó a resumar de las paredes del valle produciendo una mayor desestabilización del terreno en 1996. En el 2002, seis metros cúbicos se deslizaron, originados de ese movimiento en masa ...” Toledo, H. T.Ticona, J. (2007) -, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa,106p.

“El 29 de abril de 1999 se produce un deslizamiento y hundimiento en el anexo de Pachaqui, en un tramo de la carretera que conduce hacia Ramada y Cornejo en la margen derecha del Valle Sigwas ...”.Toledo, H. T.Ticona, J. (2007) -, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa,106p.

“El 19 de julio de 1999 se produce un deslizamiento de talud en la margen derecha del valle de Sigwas, enterrando viviendas, el canal principal de regadío y la carretera que conecta los poblados de Ramada y Cornejo. Los 4 años posteriores a este evento se tiene infiltraciones de 550 metros lineales, en el cuerpo del talud a una altura de 40 metros sobre el lecho del río ...”.Toledo, H. T.Ticona, J.(2007) , Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa,106p.

“El 16 de junio del 2003 a las 4 de la madrugada se produce un deslizamiento del talud en la margen derecha de Pachaquí, con un deslize de 500 000 m<sup>3</sup>, originando un embalse del río Sigwas, pérdida de 20 hectáreas de terrenos de cultivo, inundación de predios por el embalse e inutilización de la carretera ...”.Toledo, H. T.Ticona, J.(2007) -, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa,106p.

“El 10 de Agosto del 2005 se inicia el deslizamiento del talud en la zona de El Zarzal, ubicado en la margen derecha del río Sigwas, el fenómeno se inicia con una imperceptible grieta en el hombro del talud, la misma que fue aumentando progresivamente hasta 1200 metros ...”. Toledo, H. T.Ticona, J.(2007) -, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa,106p.

## **2.0 ASPECTOS GENERALES**

### **2.1 UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD.**

El deslizamiento San Juan de Sigwas se encuentra en el flanco derecho del Valle del río Sigwas, ubicado geográficamente en las coordenadas UTM (X: 803445.00m E; Y: 8188257.00m S), entre los distritos de Majes y San Juan de Sigwas – Arequipa, La escarpa principal se ubica 100 metros al NW de la carretera Panamericana Sur (Mapa 1)., actualmente tiene una extensión de 1.4 Kilómetros.

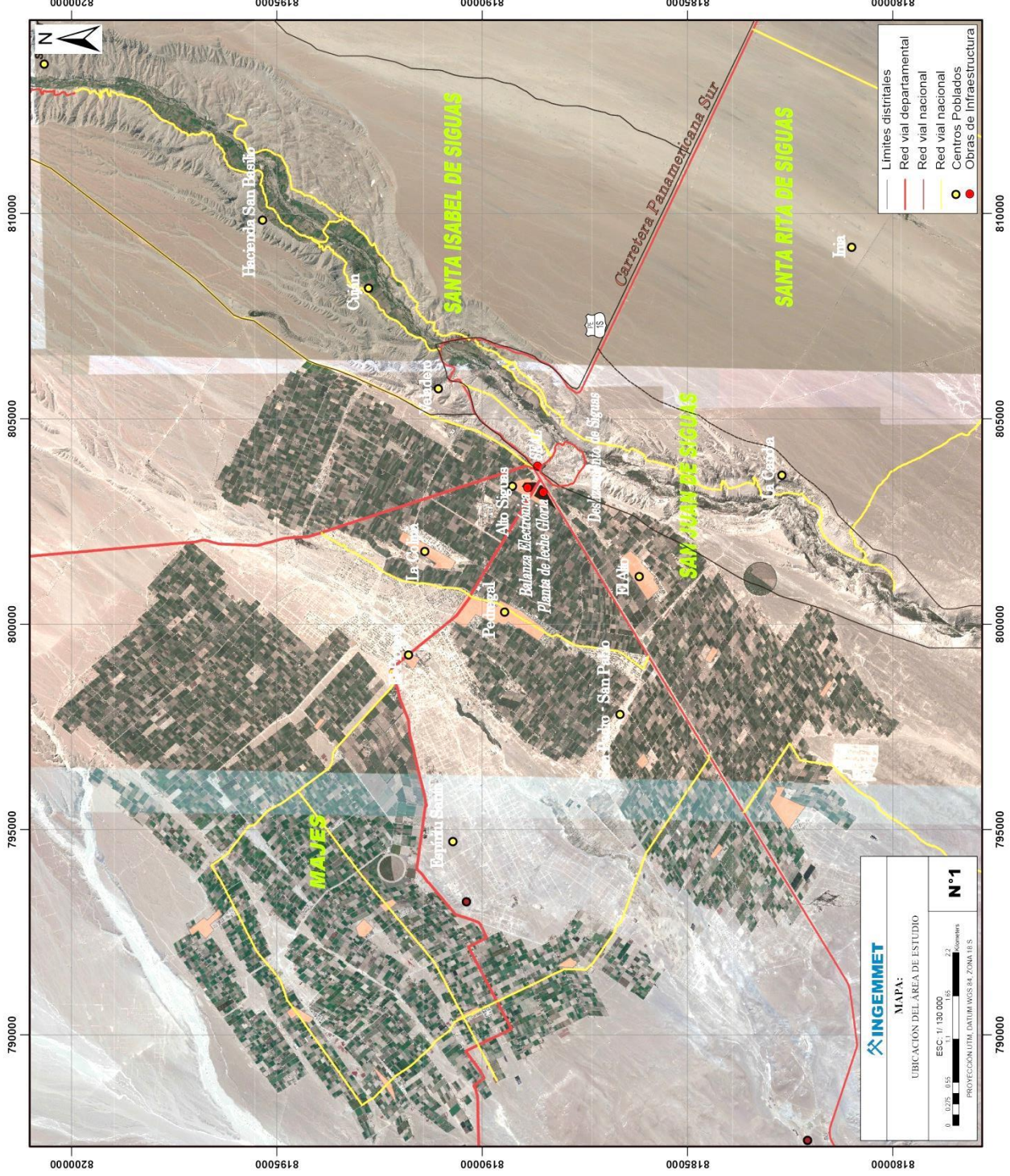
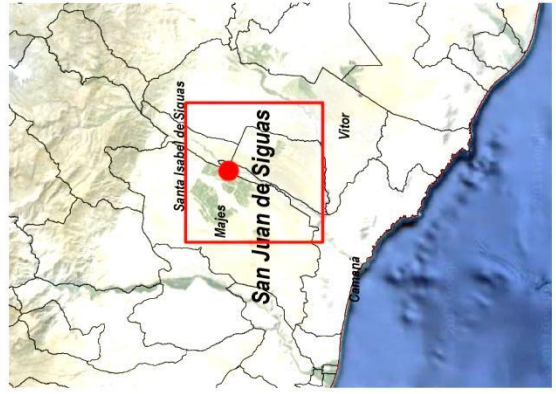
La zona de estudio es accesible por la Carretera asfaltada de la Panamericana Sur teniendo como punto de partida la ciudad de Arequipa, con un recorrido de 70 Km en un tiempo promedio de 1 hora con 30 minutos ; por el sector de Camaná y Huambo al sur oeste y norte respectivamente de la ubicación del deslizamiento se tiene un tiempo de llegada promedio de 1 hora y 30 minutos por carretera asfaltada, El área de estudio compromete carreteras de importancia nacional para el tránsito vehicular, su destrucción sería alarmante en el traslado terrestre de los viajantes y al mismo tiempo afectarían los ingresos económicos de la población, al limitarlos en el traslado y venta de sus recursos.

### **2.2 CONDICIONES CLIMÁTICAS.**

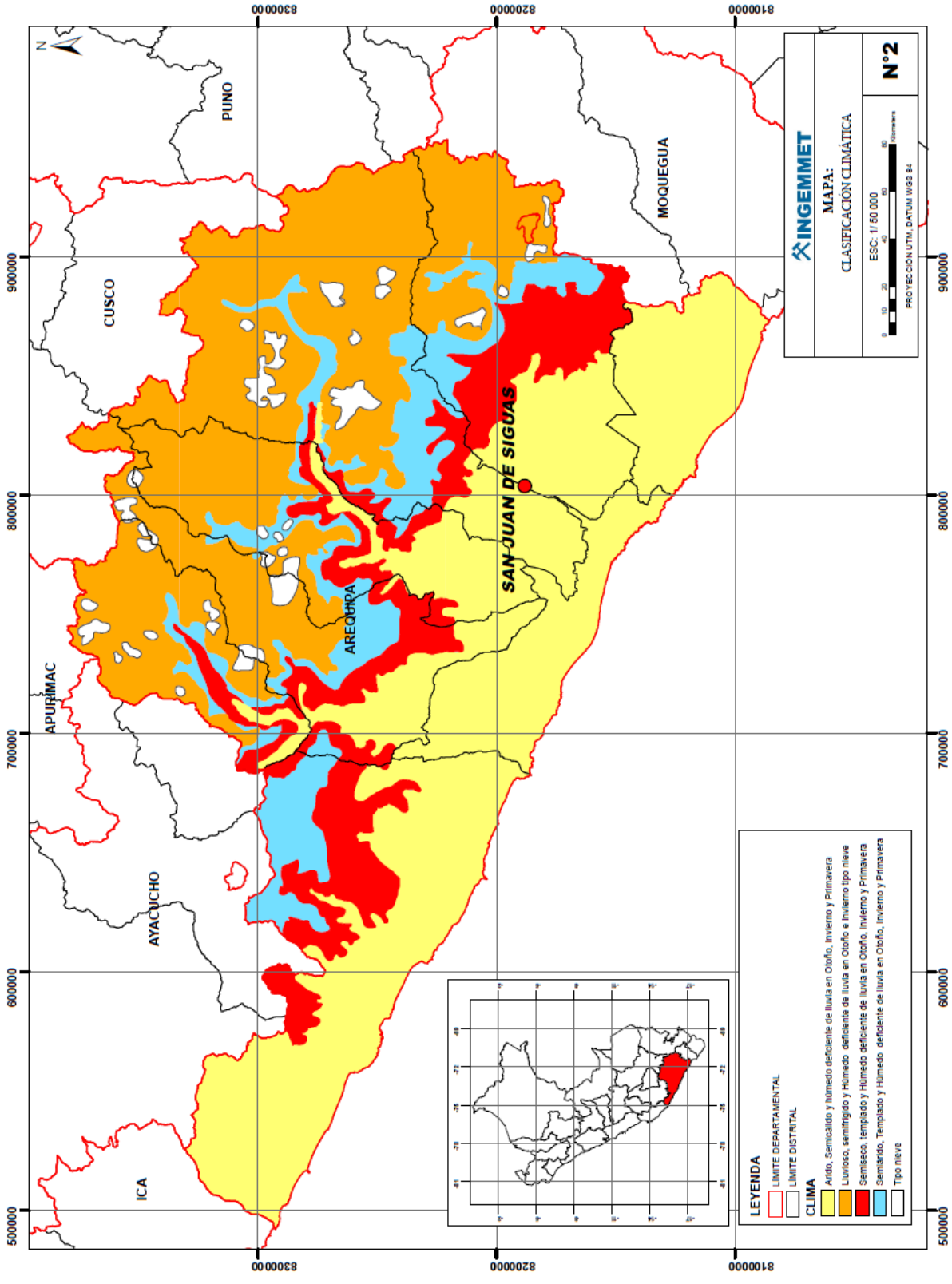
El área de estudio presenta climas áridos, semiáridos en verano y húmedos en otoño e invierno, característicos de localidades emplazadas en las estribaciones andinas entre los 1000 m.s.n.m. y 2500 m.s.n.m. (Mapa 2). La distribución de pisos altitudinales de Pulgar Vidal (1940) clasifica la zona en la región Yunga.

La estación meteorológica convencional más cercana se ubica cerca de Alto Sigwas, en el distrito de Majes a 1434 m.s.n.m. SENAMHI proporciona las lecturas de precipitaciones anuales de 0.1 l/m<sup>2</sup> a 6 l/m<sup>2</sup>, que muestra un efecto despreciable en la zona de estudio.

La temperatura máxima y mínima registrada es de 27°C y 14°C, condiciones térmicas que favorecen el desarrollo de cultivos en zonas agrícolas sumado a la disponibilidad de recurso hídrico debido al riego de cultivos por el desarrollo del proyecto de Irigación Majes – Sigwas I el año 1971.



Mapa 1: Ubicación del deslizamiento de Sigüas – Arequipa



Mapa 2: Mapa climático de la región Arequipa mostrando sus diferentes tipos de climas de acuerdo a su ubicación altitudinal. El punto rojo muestra la ubicación del deslizamiento de Sigüas Fuente: SENAMHI

### **3.0 GEOMORFOLOGÍA LOCAL**

Los flancos del valle del río Sigwas son representados por zonas altamente erosivas con pendientes empinadas, algunas forman quebradas secas profundas. En la margen izquierda y derecha inferior del valle se tiene conos de deyección antiguos con aporte sedimentario por erosión de cárcavas (Mapa N°3).

#### **3.1 Valle de Sigwas:**

La exhumación del valle se da por procesos de levantamiento orogénico en la edad Mio-pliocénica, el mismo que disecta las pampas de Majes y Sigwas con un declive empinado de 200 metros de altura.

#### **3.2 Conos de deyección:**

En la margen derecha e izquierda del valle de Sigwas se tienen conos de deyección antiguos, con reactivaciones erosivas sobre la ladera del corte del valle (Foto 1).

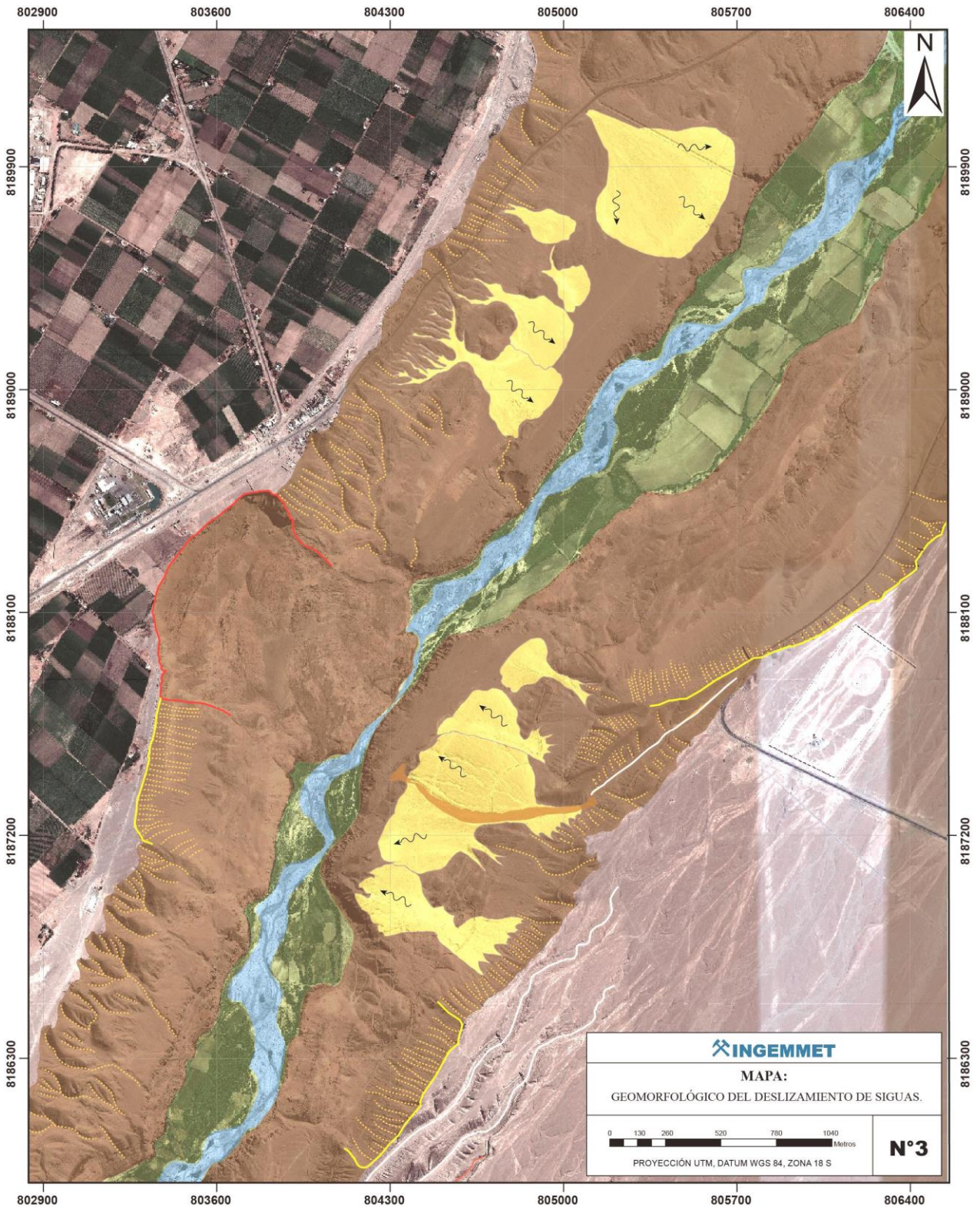
#### **3.3 Piso de Valle:**

Está formado por depósitos aluviales y fluviales producto de la actividad del río Sigwas. Es utilizado como terrenos de cultivo que son afectados por el constante desplazamiento del cuerpo del deslizamiento (Foto 2).

#### **3.4 Río Sigwas:**

Nace en la parte alta de los Andes Occidentales en las cercanías del nevado Ampato. Al igual que el río Majes, son los únicos que tienen agua durante todo el año y no reciben tributarios importantes en su recorrido. Tiene una dirección promedio de 35°N y a lo largo de su trayecto, su cauce puede ser alterado por la existencia de movimientos en masas que provocan un ligero cambio de curso, generando barras arenosas sobre las extensiones de la parte baja del valle del río Sigwas.





LEYENDA	SIMBOLOGÍA
Valle de Sihuas	Deslizamiento Antiguo
Conos de Deyección	Deslizamiento Activo de Sihuas
Flujos de Derrubios	Quebradas
Cauces del Río	Cárcavas
Zona de Inundación	Dirección de Canales de Flujos

Mapa 3: Geomorfología Local del Valle de Sihuas con enfoque en estructuras aledañas al deslizamiento de San Juan de Sihuas



Foto 1: Flanco izquierdo del Valle del río de Sigüas, se observa conos de deyección producto de desprendimiento de detritos por erosión diferencial.



Foto 2: Vista del flanco derecho del valle del río de Sigüas, se observa terrenos de cultivos de alfalfa sobre el piso del valle, afectados por variación del curso del río.

## 4.0 UNIDADES LITOLÓGICAS

El área de estudio está formado por unidades geológicas de edades Cenozoicas y Cuaternarias que relatan la historia deposicional y erosiva del valle, estas son: La Formación Moquegua y depósitos cuaternarios.

### 4.1 FORMACIÓN MOQUEGUA (Nmp-mo):

El relleno sedimentario continental de la formación Moquegua se divide en dos fases distintas.

La formación Moquegua Inferior, corresponde al relleno de una depresión estable sin ninguna influencia volcánica y la formación Moquegua Superior, muestra una movilidad de la cuenca que se confirma por la existencia de conos aluviales y materiales volcánicos.

Las dos fases de relleno están separadas por una fase tectónica de baja intensidad que se aplica a toda la cuenca. La datación de la formación Moquegua inferior es aun problemática, en cambio, la existencia de tobas ácidas permitió que se datara la formación Moquegua superior con una edad Oligocena superior (Marocco et al., 1984); (Sempere et al., 2004)

**Moquegua Inferior (Peo-Mi):** Las capas de esta formación descansan con discordancia angular sobre los grupos Ambo y Yura , soportado a su vez con débil discordancia al Moquegua superior, las capas se inclinan ligeramente al SW, salvo en aquellos lugares donde se han producido inclinaciones más fuertes por el reajuste de fallas existentes o por la compactación de los sedimentos sobre una topografía inclinada, litológicamente el área está compuesta por areniscas arcósicas de grano medio, arcillas rojas y conglomerados abundantes en bancos de 50 a 150 metros, las arcillas se intercalan también con láminas de yeso (Guisado, 1968)

**Moquegua Superior (Po-Ms):** Reposo en discordancia angular sobre la formación Moquegua Inferior, litológicamente formados por conos aluviales, sedimentos conglomerádicos, con influencia de actividad volcánica (Foto 3). Durante su depositación la formación Moquegua Superior fue afectada por intrusión marítima, teniéndose evidencias de depósitos marinos de la formación Camaná a lo largo de en el sector de Ocoña y Caravelí (Marocco et al.,1984).

Este miembro es fácilmente distinguido por sus tonalidades claras que contrastan con la formación Moquegua Inferior, por lo general sus capas tienen posición horizontal y en algunos casos muestran una ligera inclinación al suroeste. Litologicamente, esta formación está formada por areniscas blanco grisáceas, de grano medio a fino, hasta conglomerádicas, con algunas capas de arcilla y conglomerado de cantos chicos (Guisado, 1968)



Foto 3: Conglomerados concordantes y bancos de Ignimbrita de la Formación Moquegua Superior.

#### 4.2 DEPÓSITOS ALUVIALES (Q-al)

**Conglomerados pleistocénicos:** Esta unidad litológica sobryace sobre la formación Moquegua Superior a lo largo de las pampas costaneras de Majes y San Juan de Sigvas, presenta una potencia mayor a 50 metros, debe su origen a épocas de intensa actividad regional erosiva en desglaciaciones andinas cuaternarias.

Está formada por Conglomerados de matriz areno – limosa, con clastos de 10 a 1 metros de diámetro de naturaleza volcánica, sedimentaria y metamórfica (Fotos 4 y 5) .



Foto 4: Vista superior del flanco derecho de la escarpa del deslizamiento.



Foto 5: Conglomerados clasto soportado de 10 a 1 metro de diámetro.

**Depósitos aluviales cuaternarios:** Los depósitos cuaternarios aluviales más recientes forman parte de la acumulación de materiales recientes en los drenajes y desembocaduras de quebradas. Tienen una dirección preferencial noreste-suroeste similar a la del río Sigvas. Litológicamente, los depósitos aluviales están constituidos por arenas mal seleccionadas con matriz arenosa, limosa arcillosa o limo-arenosa.

Los depósitos aluviales más extensos se ubican en la cabecera de las líneas de drenaje y al pie del flanco andino. El tamaño de los elementos constituyentes desde bloques de más de un metro hasta partículas de arcillas.

**Terraza indiferenciada (qh-t):** Las terrazas fluviales a lo largo del valle de Sigwas no tienen gran longevidad porque la constante actividad del río provoca su erosión (Foto 6)



Foto 6: Terraza Fluvial altamente agrietada y destruida.

#### **4.3 DEPÓSITOS COLUVIALES (Q-co):**

Formados por el desprendimiento de sedimentos conglomerádicos sobre el piso del valle del río

#### **4.4 DEPÓSITOS EÓLICOS (Q-e):**

Las estructuras que caracterizan este tipo de depósitos principalmente se encuentran dispuestas al Sureste del área de estudio (Foto 7), están representadas por cadenas de dunas aisladas sobre quebradas secas que disectan las pampas de Sigwas. Tienen tamaños de más de 5m de longitud y 3 metros de altura en dirección Suroeste a Noreste, habiéndose estimado avance anual de 25 metros (Guisado, 1968).

Sobre el cuerpo del deslizamiento se encuentran estructuras eólicas sobre material arenoso (Foto 8)



Foto 7: Dunas al suroeste del área de estudio de 5-10m de longitud.



Foto 8: Formación de ripples sobre el cuerpo del deslizamiento.

## 5.0 DINÁMICA DEL DESLIZAMIENTO DE SIGUAS.

El proceso en estudio corresponde a un peligro geológico correspondiente a un movimiento en masa de tipo deslizamiento rotacional retrogresivo, dinámicamente activo y de movimiento lento - moderado, denominado Deslizamiento de Siguas

El análisis de la evolución del deslizamiento está basado en el cartografiado de imágenes satelitales multitemporales y en el monitoreo reciente de puntos de geocontrol sobre la escarpa y cuerpo del deslizamiento. Según la escala de velocidades de Cruden y Varnes (1996) el deslizamiento de Siguas es un movimiento de lento a Moderado.

### 5.1 ESTADO DEL DESLIZAMIENTO 2004

En la imagen satelital del 2004, el área estaba delimitada por el corte de valle y conos aluviales antiguos sobre la pendiente.

Después de la construcción del proyecto de irrigación Majes –Siguas I, que abasteció de recurso hídrico al sector El pedregal, los habitantes extendían sus terrenos de cultivo e infraestructura (caso de los almacenes de SEAL) de 10 a 50 metros desde el límite del Valle del río Siguas.

La parte baja del corte de valle, presentaba zonas de reactivación de escarpas, cárcavas, conos aluviales y origen de pequeños deslizamientos, cuya masa se extendía 90 metros sobre el piso de valle, además de la presencia de zonas de humedad producto de la infiltración de agua como agente desestabilizador. Las fotos 9 al 13 muestran el estado del deslizamiento en marzo del 2007. (Mapa 4).



Foto 9: Cuerpo del deslizamiento en 2007, presencia de agrietamientos y presencia de movimientos tipo propagación lateral al pie del deslizamiento





Foto 10: Detalle de agrietamientos paralelos al talud, indicando la actividad del deslizamiento



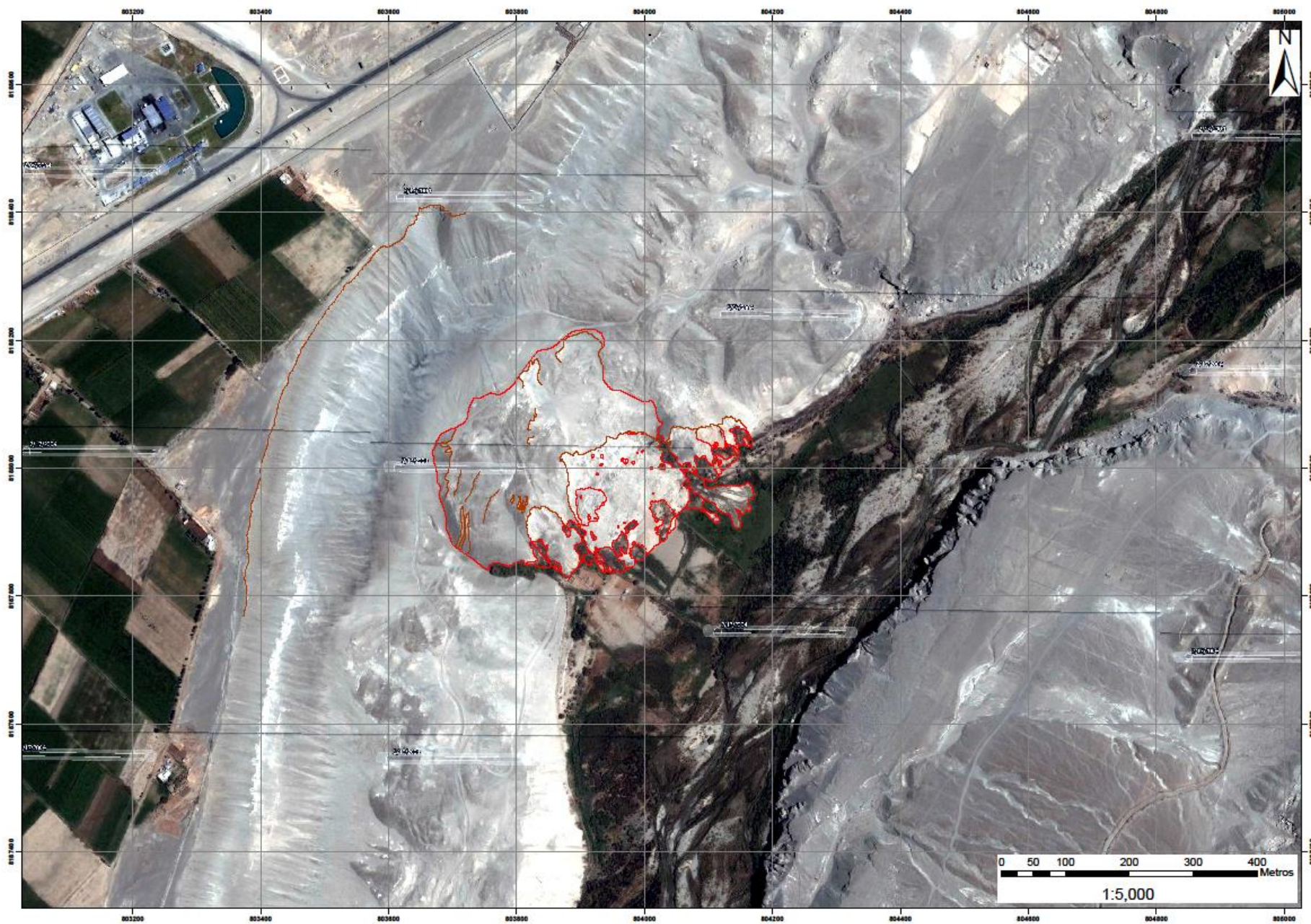
Foto 11: Presencia de filtraciones a través de una capa permeable



Foto 12: El deslizamiento “levantó” un cementerio precolombino situado al pie del deslizamiento



Foto 13: Aspecto del talud superior del deslizamiento (escarpa) en 2007. Obsérvese los materiales inconsolidados correspondientes a la Formación Moquegua.



Mapa 5: Cartografiado del deslizamiento de Sigüas, año 2004.

## 5.2 ESTADO DEL DESLIZAMIENTO 2010

Basado en la imagen de satélite del 2010 (Mapa 5), el deslizamiento de Sigwas tiene una escarpa de 1250 metros de longitud, destruyendo una superficie de 6860 m/año desde el 2004.

El deslizamiento cubre casi la totalidad del piso de valle contiguo y se aprecia estructuras de erosión y deformación. Con fines explicativos, el deslizamiento se ha zonificado en tres zonas las cuales se muestran en el perfil transversal de la Figura 1.

La **zona de arranque o escarpa**: Tiene un plano de ruptura expuesto de 20 a 25 metros de altura, donde muestra la disposición horizontal de materiales conglomerádicos e ignimbriticos con laminación paralela, pertenecientes a la formación Moquegua Superior (Fotos 14 (a,b)). Es en este sector donde se tiene constantemente desprendimiento de materiales por una intensa actividad erosiva producto del viento, la vibración generada por la carretera Panamericana y agentes gravitacionales.

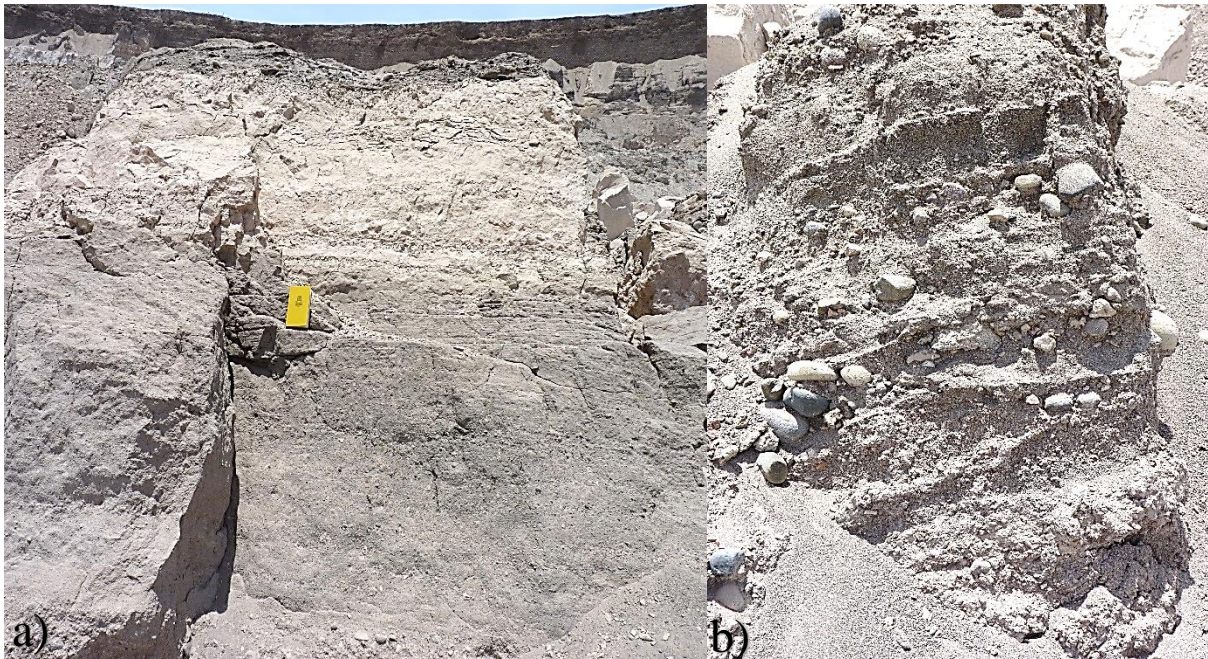


Foto 14: a). Muestra bloques de Ignimbrita concordante a material conglomerádico; b). Se observa bloques de conglomerado con matriz areno- limoso

La **zona de compresión o depósito**: Formado por bloques altamente diaclasados, sedimentos gravosos bien seleccionados, se observan estructuras de segregación granular de clastos de 20cm de diámetro producto de procesos de compresión sobre la masa del deslizamiento (Foto 15).

Sobre el cuerpo se tiene abundante material suelto de clastos redondeados, arenas y limos con agrietamientos de 10cm. de apertura (Foto 16).



Foto 15: Estructuras de compresión visibles por selección granular de clastos sobre la zona de depósito

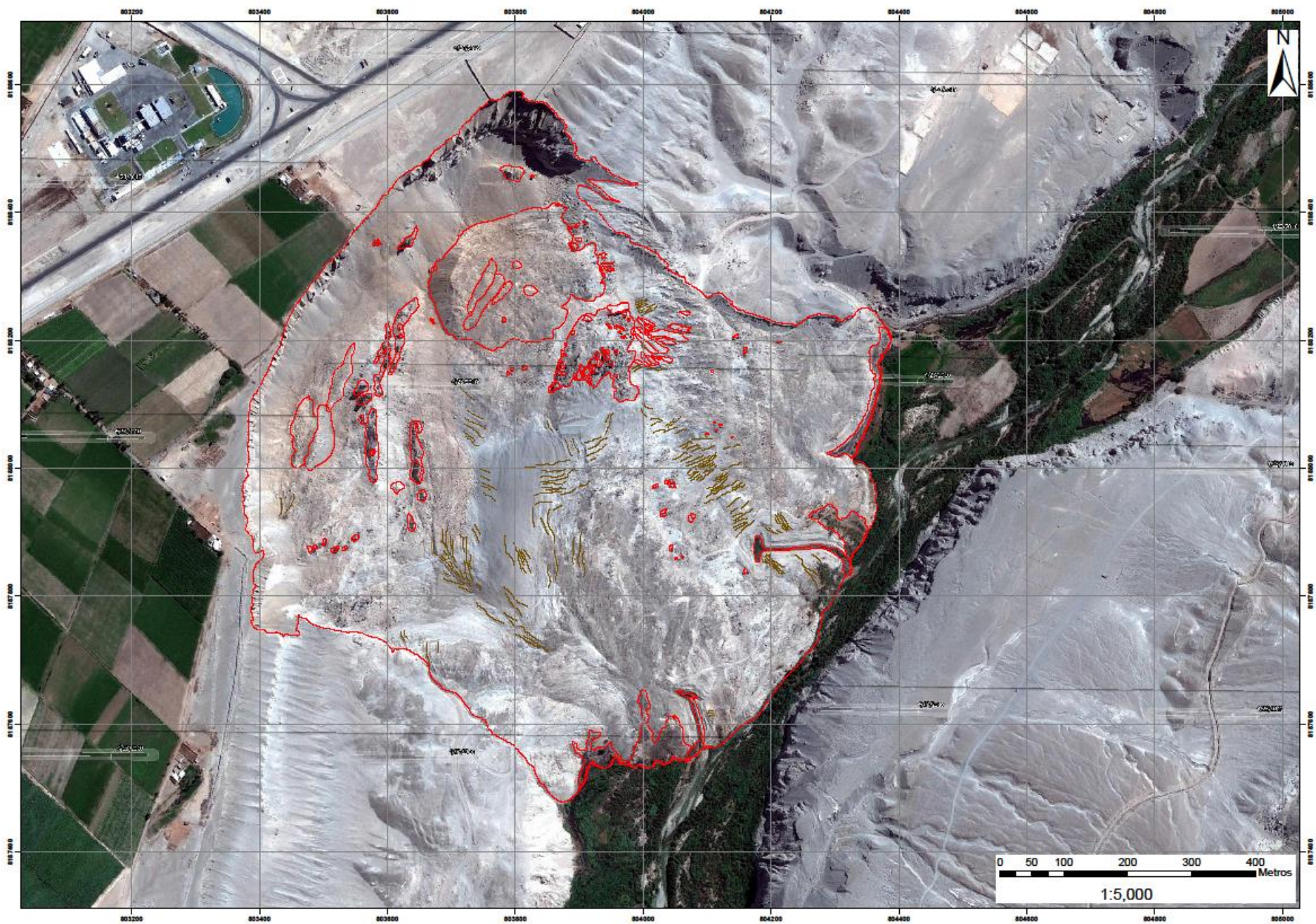


Foto 16: Agrietamientos sobre el material no consolidado.

La **zona de caída o pie del deslizamiento**: Se encuentra mayormente material gravoso dentro de una matriz de ceniza, con agrietamientos de 5 centímetros de apertura. El 2010 la masa del deslizamiento se extendió 355 metros sobre el piso de valle afectando superficies hasta de 0.17 km<sup>2</sup> (Foto 17).



Foto 17: La masa del pie del deslizamiento afecta áreas del piso de valle. Presencia de filtraciones



Mapa 5: Cartografiado del deslizamiento de Sigüas, año 2010.

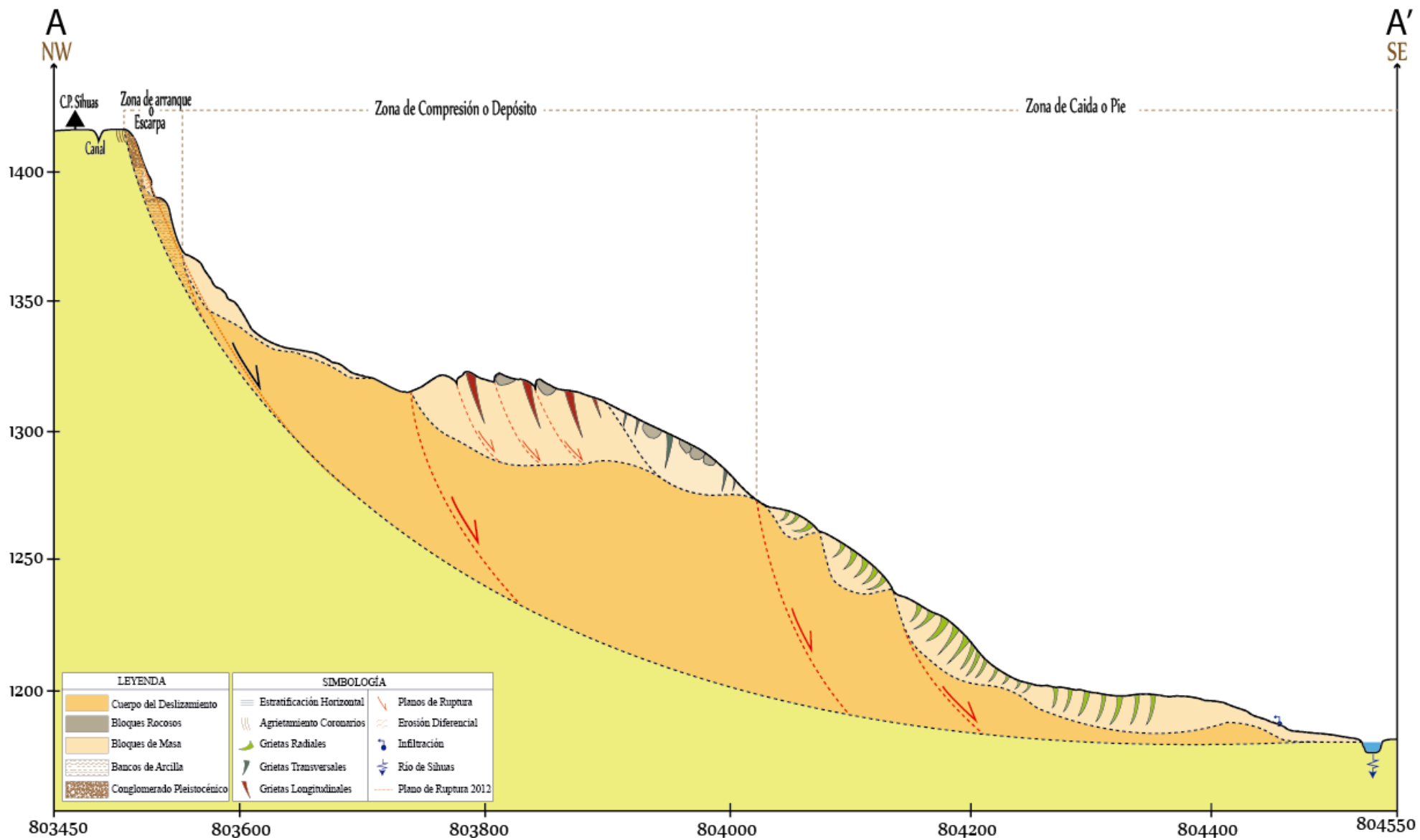


Figura 1: Perfil transversal “Corte A - A’ “del deslizamiento de Sigüas, año 2010.



### 5.3 ESTADO DEL DESLIZAMIENTO 2012

En el año 2012 (Mapa 6), la escarpa del deslizamiento tiene 1350 metros de longitud, con presencia de grietas coronarias de 2 a 3 metros de longitud con 10 cm de apertura -.

Los bloques de la zona de compresión tuvieron un promedio de desplazamiento de 65 metros en dirección Sureste respecto al cartografiado de las estructuras de deformación del año 2010.

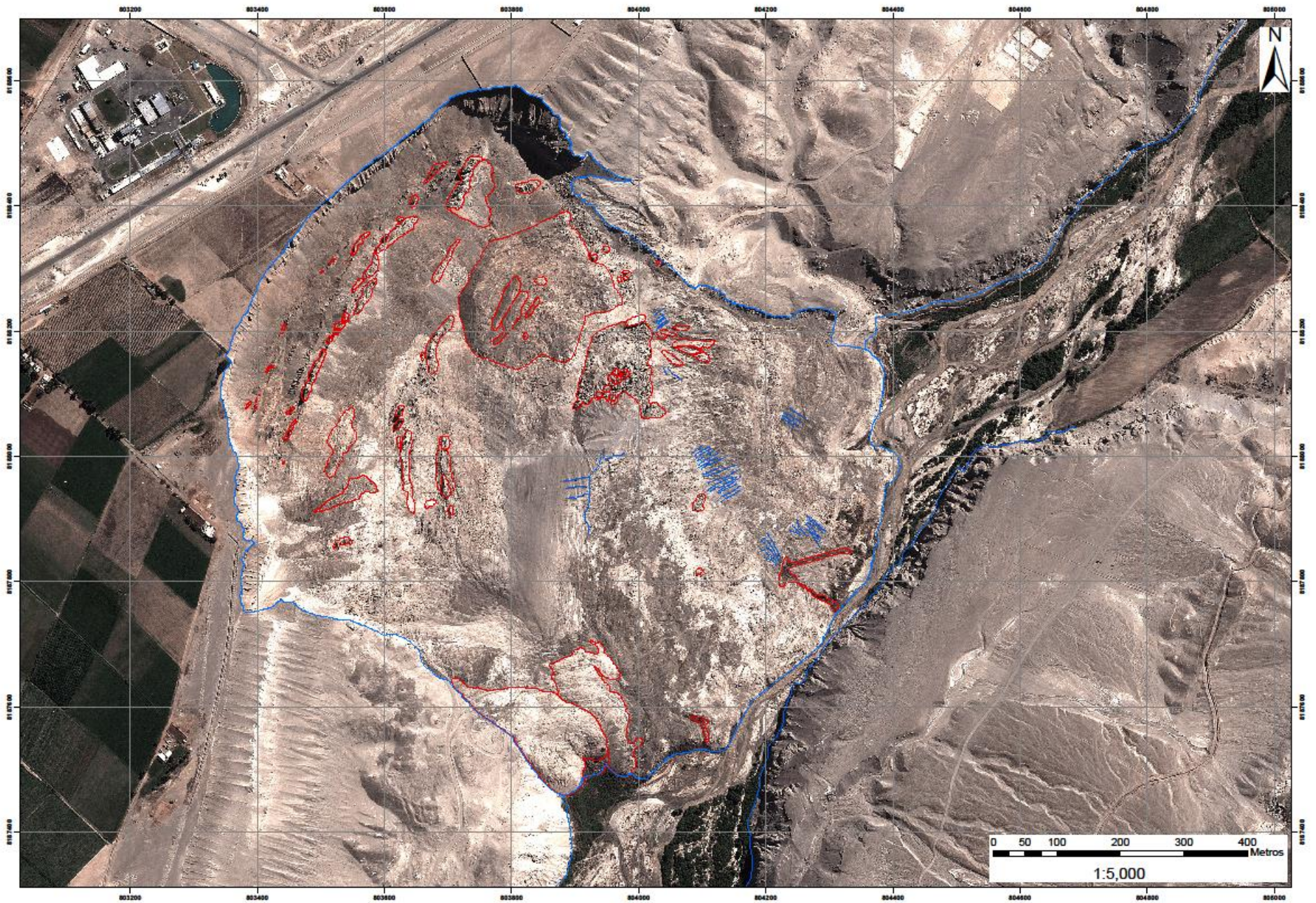
Sobre el cuerpo del deslizamiento se observa grietas radiales y longitudinales de extensión y compresión con desplazamientos de 75 metros respecto al año 2010, lo que indica un avance aproximado de 32.5 metros anuales, siendo un movimiento comprendido entre lento y muy lento según la Escala de Velocidades de Cruden y Varnes (1996).

La masa de acumulación del deslizamiento se extendió sobre el piso del valle una distancia promedio de 30 metros afectando superficies hasta de 200 000m<sup>2</sup>.

El 2014 se produce un estrangulamiento del cauce del río Sigwas, generando una laguna de 84,000 m<sup>2</sup> (Foto 18).



Foto 18: Muestra la formación de la laguna como producto del represamiento del río Sigwas, producto del deslizamiento.



Mapa 6: Cartografiado del deslizamiento de Sigüas, año 2012.

#### 5.4 ESTADO DEL DESLIZAMIENTO 2015

La imagen aérea del 2015 proporcionada por CONIDA (Mapa 7), muestra una escarpa principal de 1370 metros de longitud.

Los bloques dispuestos en la zona de compresión tuvieron un desplazamiento promedio de 65 metros en dirección Sureste con una velocidad de 22 metros/año. Respecto al cartografiado de las estructuras de deformación del año 2012, la zona de caída o pie del deslizamiento está formada principalmente por estructuras de estriamiento radial alcanzando desplazamientos de 100 metros con el avance aproximado de 33 metros anuales con respecto al año 2012

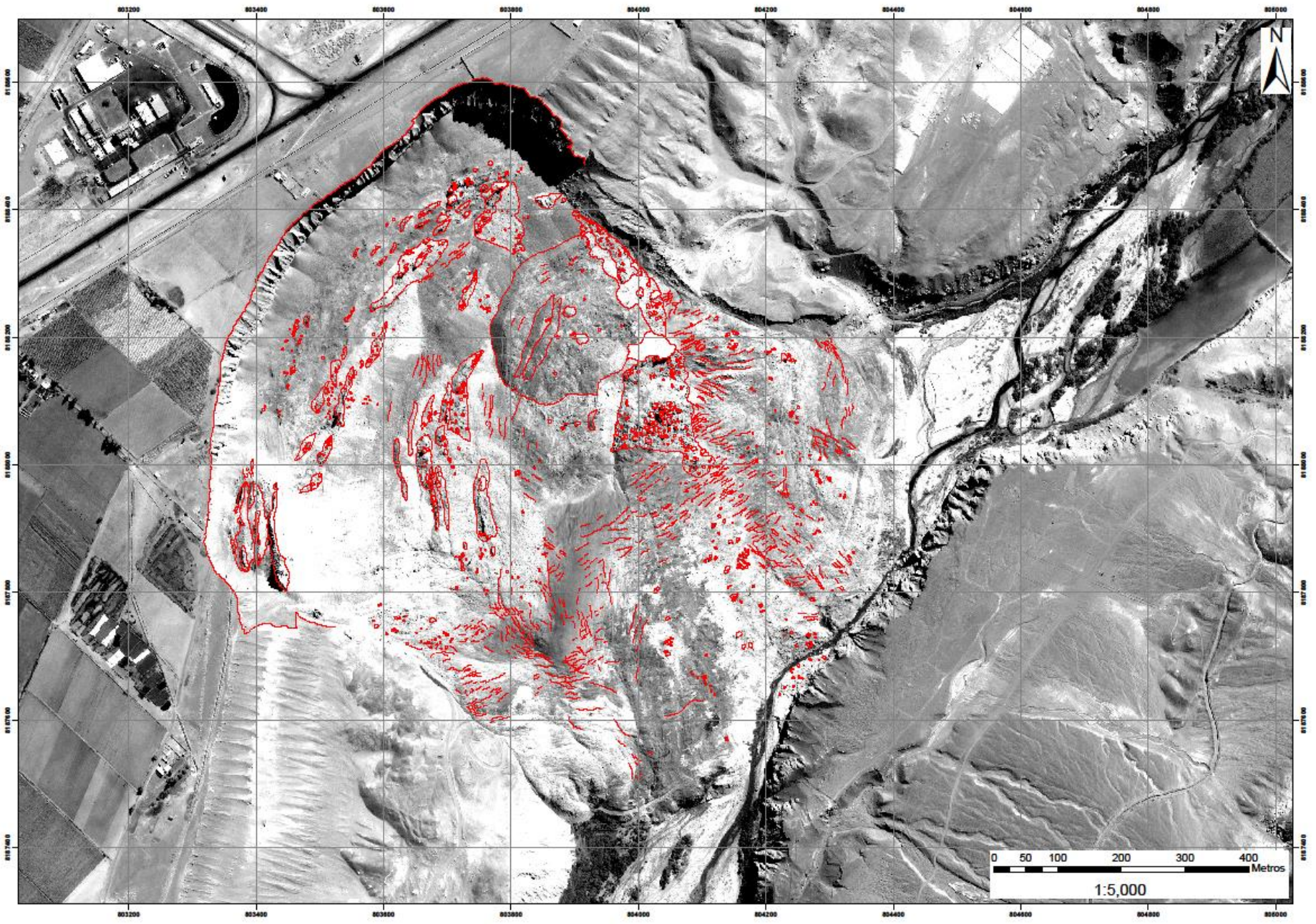
Sobre el cuerpo del deslizamiento se observan bloques de conglomerados altamente fracturados. Sobre materiales ignimbríticos de 2.5 metros de diámetro, que se mueven lentamente por compresión de la masa (Fotos 19 y 20).



Foto 19: Bloque fracturado sobre la zona de compresión del cuerpo del deslizamiento.



Foto 20: Sedimentos gravosos que muestran estructuras de compresión en la zona de depósito del deslizamiento.



Mapa 7: Cartografiado del deslizamiento de Sigüas, año 2015.

## **6.0 DINÁMICA DE DESPLAZAMIENTO Y DEFORMACION DEL DESLIZAMIENTO DE SIGUAS.**

### **6.1 DINÁMICA DE DESPLAZAMIENTO DE BLOQUES**

Uno de los tipos de monitoreo que se realiza en el deslizamiento de Siguas está basado en el uso de imágenes satelitales cronológicas (obtenidas de softwares de cartografiado como Google Earth, Terraigconita e imágenes pleaides proporcionadas por CONIDA ), que sirvieron de base para el cartografiado detallado de bloques y agrietamientos sobre la masa deslizada, esta metodología da una visión panorámica de la evolución temporal del deslizamiento. Los bloques son desplazados varios metros a favor de la pendiente conservando su geometría, pequeñas estructuras de compresión y agrietamientos, mientras que otros desaparecen al ser afectados por erosión y diaclasamiento o son generados por deformación de su escarpa, la misma que contribuye en el aporte de sedimentos.

Por disposición morfológica, litológica, dinámica y principalmente mejores fines explicativos, el perfil del deslizamiento fue sectorizado en tres zonas, estas son: Zona Alta (Arranque o escarpa), Zona Media (compresión o depósito) y Zona Baja (caída o pie) (Figura 2).

Se tiene pocos datos de desplazamiento de bloques en la zona alta porque no hay un control cronológico de los mismos, en vista que eran inexistentes años anteriores, esto explica la dinámica retrogresiva y aporte constante de sedimentos sobre la masa desplazada. En la zona media, el deslizamiento tiene bloques de conglomerado, ignimbrita, arena y arcilla medianamente consolidados, de 2 a 3 metros de diámetro, dispuestos sobre material suelto de gravas mal seleccionadas con clastos de 10 -20 cm de diámetro, es en esta zona de depósito donde se produce estructuras de compresión por segregación granular, estas geoformas son montículos alargados de cantos redondeados mayores a 10 cm. de diámetro, paralelos entre si y a la geometría de la escarpa del deslizamiento. La zona Baja presenta mayor cantidad de bloques ignimbriticos altamente fragmentados, dispuestos caóticamente, la matriz es arenosa y limosa lo que facilita la presencia de agrietamiento de varios metros de longitud con aperturas de 10cm a lo largo de la zona baja o pie del material desplazado.

De la totalidad de bloques cartografiados, 70 fueron seleccionados para el análisis del desplazamiento sobre las tres zonas de la masa deslizada, en periodos de tiempo de 2 y tres años, la selección de bloques está basada en la continuidad de existencia de bloques en las imágenes de satélite del 2010, 2012 y 2015. Donde las distancias de desplazamiento entre los años 2010-2012 y 2012-2015 son generados a partir de los puntos centrales de cada bloque cartografiado, mostrando inclinaciones de 320° respecto al norte principalmente en la zona media y final del cuerpo del deslizamiento (Figura 2).

Para el análisis de la zona alta media y baja, se realizó diagramas de frecuencia, en base a intervalos de longitudes de desplazamiento de bloques, donde el promedio de distancia de la mayor cantidad de datos, de donde se tiene desplazamientos promedios de 55, 56 y 76 metros en un periodo de dos años (2010-2012) y 54,64 y 103 metros en un periodo de tres años (2012-2015). Siendo actualmente la zona baja (caída de pie) y la zona media o de depósito las que presentan mayor dinámica de desplazamiento (Figura 2).

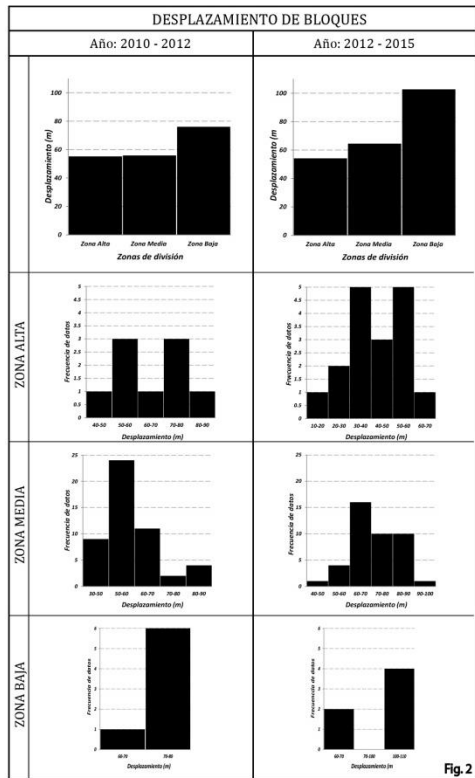
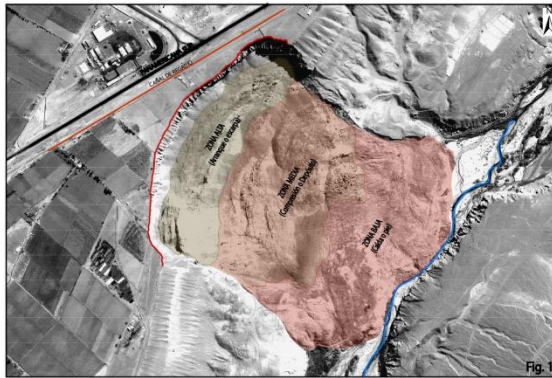


Fig.2

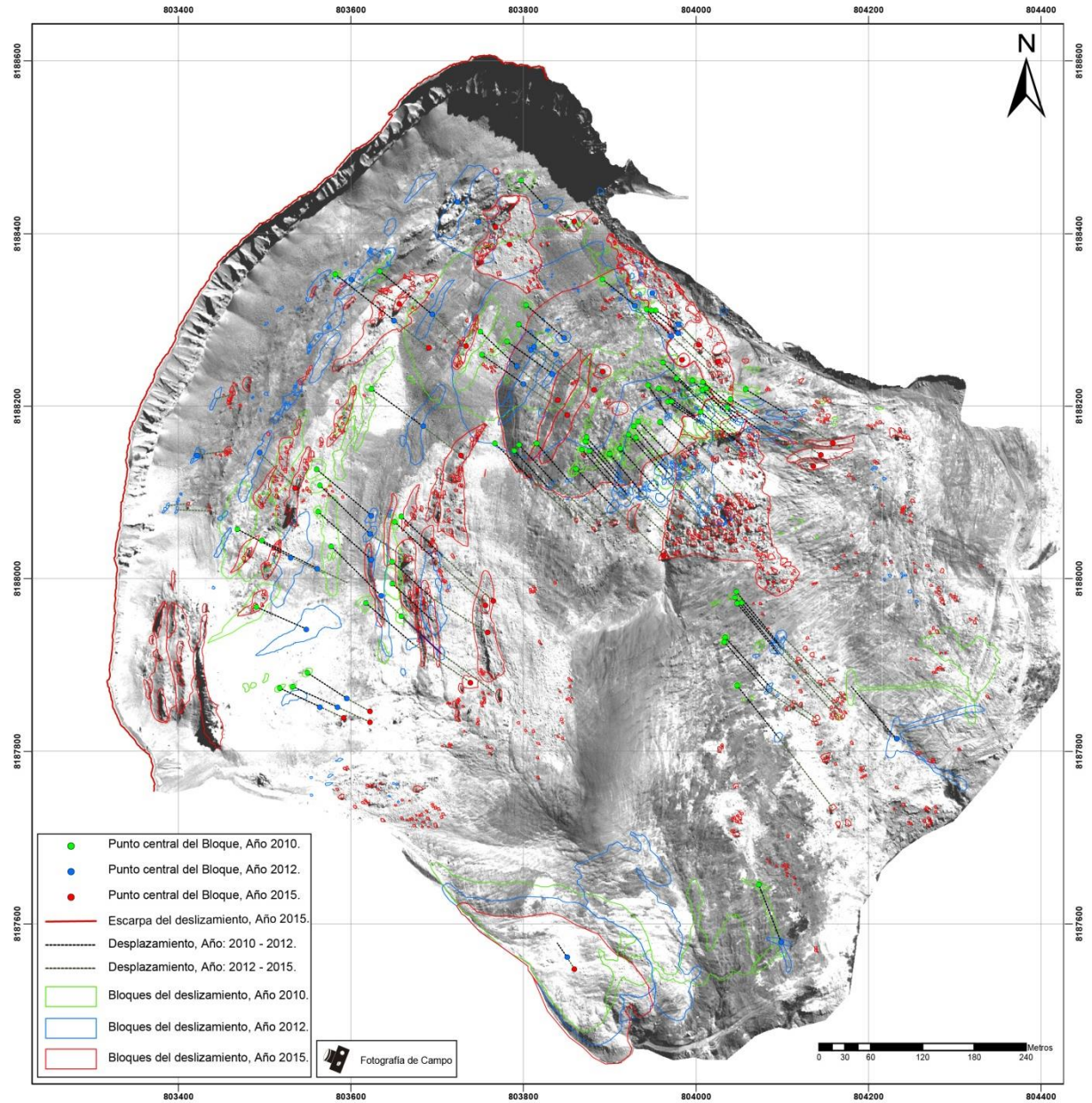


Figura 2: Vectores de desplazamiento sobre el cuerpo del deslizamiento de Sigüas, generados a partir del cartografiado de bloques. Al lado derecho se observa la Sectorización Alta, media y baja de la masa deslizada y diagramas de frecuencia de la dinámica de desplazamiento de bloques en los años: 2010-2012 y 2012-2015.

Años atrás, el constante desplazamiento de la masa deslizada ha ido provocando el cierre de valle del Rio siguas por la formación de represas naturales que suspende el curso del rio, volviéndose indispensable un monitoreo constante del deslizamiento de Siguas para estimar periodos de tiempo en el que sus avances provocarían eventos de represamiento que afectarían económicamente a los pobladores del Pedregal por encontrarse terrenos de cultivo en las cercanías del movimiento.

El uso de imágenes satelitales para la identificación del desplazamiento da una visión general de su dinámica, pero recientemente frente a la necesidad de obtener valores constantes de desplazamiento se optó por realizar un monitoreo más preciso, mediante el uso de sistemas de posicionamiento espacial a tiempo real (GPS-RTK). Con ese objetivo, preliminarmente se anclaron 27 hitos de control sobre la zona media y baja dentro del cuerpo del deslizamiento (figura 5), los que serán medidos constantemente para obtener las dimensiones exactas de desplazamiento y estimación de periodos de tiempo en los que su movimiento afectaría el cauce del rio Siguas. El punto de control base se encuentra ubicado en el flanco izquierdo del Valle del rio Siguas.

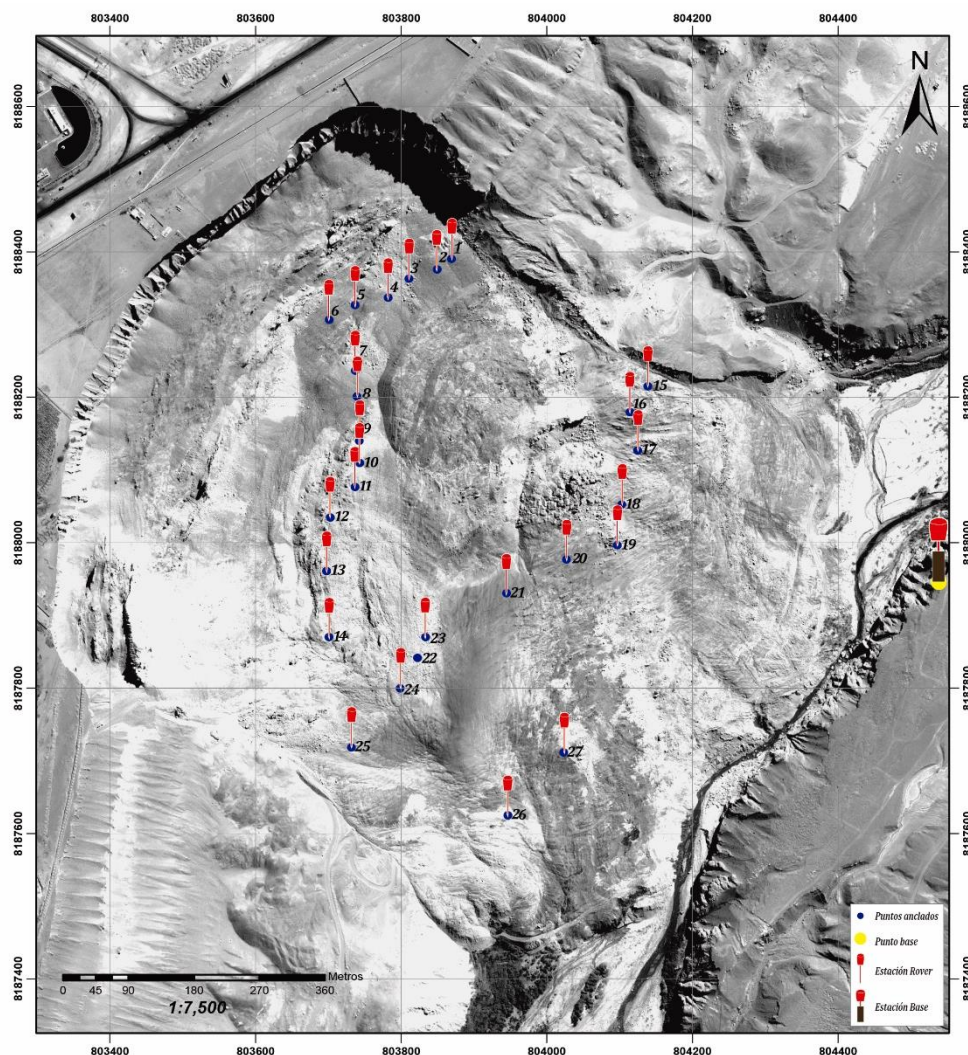


Figura 5: Distribución de puntos de monitoreo sobre el cuerpo del deslizamiento de Siguas.



## 6.2 DINÁMICA DE DEFORMACIÓN DE LA ESCARPA DEL DESLIZAMIENTO

La deformación de la escarpa está basado en el cálculo de distancias cronológicas “vectores de desplazamiento” perpendiculares a una estructura estable, tal es el caso del canal de regadío, ubicado a 41 metros de la escarpa principal (figura 4).

Se realizaron 82 medidas de control sobre el canal de regadío, teniendo como estación base las instalaciones del hotel Riviera. Los vectores de desplazamiento parten de cada punto de control a las escarpas del deslizamiento en el año 2004, 2010, 2012 y 2015 (Figura 4). Los vectores de deformación fueron divididos en tres sectores, basados en nivel de destrucción que generó la escarpa a lo largo de su extensión sobre los terrenos de “El Pedregal”, estos son: Sector 1 engloba el análisis del vector N°1 al N°20 (Lado derecho de la escarpa); Sector 2 con vectores del N°21 al N°67(Lado central ); Sector 3 abarca vectores del N°68 al N°82 (Lado Izquierdo de la escarpa) (Figura 4).

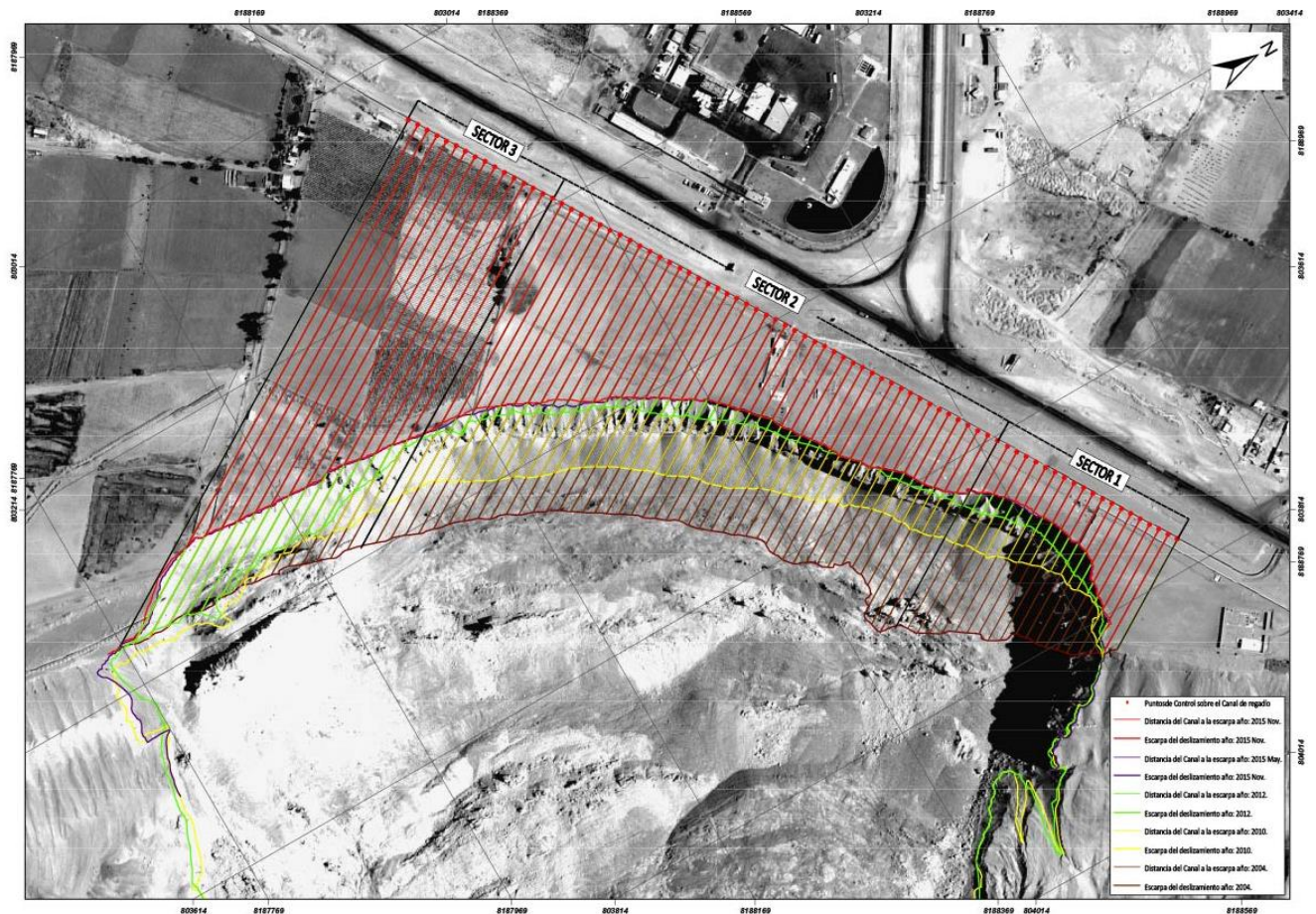


Figura 4: Vectores de desplazamiento, generados desde el canal de regadío, en periodos de evolución diferente, divididos en sectores de análisis.

El cartografiado de la escarpa del deslizamiento de Sigüas desde el 2004 hasta el 2015 fue realizado en base al uso de imágenes satelitales cronológicas. Durante este lapso de tiempo la escarpa tuvo un comportamiento retrogresivo con ampliación de sus dimensiones, ocasionando la pérdida de hectáreas de terreno e infraestructura sobre las extensiones de “El Pedregal”.

El comportamiento de los componentes geológicos frente a los agentes erosivos y de saturación es variable a lo largo del plano de ruptura expuesto de la escarpa, hacia el lado derecho las paredes del plano son verticales y aparentemente presenta una alta competencia, mientras que en el lado izquierdo se tiene surcos erosivos dando una apariencia de inclinación moderada. Estas características están relacionadas a su vez con sectores de valores de deformación alta y baja en distintos periodos de tiempo. Estas diferencias en el comportamiento evolutivo nos da pie a sectorizar la escarpa de Sigüas en cuatro: Sector 1 (flanco derecho de la escarpa), sector 2, 3 (zona central de la escarpa), sector 4 (flanco izquierdo de la escarpa) (Figura 5.a).

El análisis evolutivo de la escarpa del deslizamiento de Sigüas, tiene como base la toma a tiempo real de 80 puntos de control cada 10 metros sobre el canal de irrigación (estructura estable de 57° de inclinación, ubicada a 46 metros de la escarpa actual del movimiento) y el cartografiado a detalle de la escarpa en periodos de 6 (2004-2010), 2 (2010-2012), 3 (2012-2015) y un año (mayo a noviembre del 2015) este último fue calculado en trabajos de campo con el uso del actual sistema de monitoreo a tiempo real (GPS-RTK). Los que sirven de límites para el trazo de vectores de deformación perpendiculares al canal de regadío en cada periodo de análisis.

El sector 1 presenta el análisis de 11 vectores mientras que el sector 2, 3, 4 tienen 23 vectores entre sus límites, los valores numéricos obtenidos en los cuatro periodos de análisis son agrupados en intervalos de deformación para el cálculo de frecuencias, dicho análisis determinará el promedio de deformaciones de la mayor cantidad de datos en los sectores 1, 2, 3 y 4 (Figura 5.b).

En un periodo de 6 años (2004-2010): El sector 4 es el que presentó mayor actividad con deformaciones entre 80-100 metros (Figura 5.c1), seguido del sector 3 y 2 con pérdidas de terreno de 40-50 metros, el sector 1 tuvo deformaciones entre 20-30 metros lo que indica que la escarpa del deslizamiento para el año 2010 se extendió al noreste, adoptando una forma elongada, La curva de deformación es una línea decreciente de izquierda a derecha (sector 4 a sector 1) (Figura 5.c2).

En un periodo de 2 años (2010-2012): El sector 2 y 3 son los que presentan mayor actividad con valores de deformación entre 40 -80 metros respectivamente (Figura 5.c1), el sector 4 tiene valores de deformación en intervalos de 30-40 metros y el sector 1 tiene deformaciones de 0-10 metros por lo que es considerado un área con deformaciones bajas, la curva de deformación en un periodo de dos años en los cuatro sectores tiene como gráfica una parábola con deformaciones máximas en el sector 2 y 3, decreciendo significativamente hacia los extremos (Figura 5.c2), dicho comportamiento muestra la forma circular que la escarpa desarrolló para el año 2012 (Figura 5.a).

En un periodo de tres años (2012-2015): El sector 1 es el que representa la zona de deformación más activa con valores entre 60-120 metros (Figura 5.c1), intervalos que años anteriores no se presentaba en un periodo de tiempo tan corto y mucho menos en este sector, las deformaciones del sector 4 varían entre 15-20 metros, mientras el

sector 2 y 3 tienen valores de deformación comprendidos entre 5-10 metros, la curva de deformación de la escarpa entre el 2012-2015 tiene por gráfica una función convexa con valores crecientes a los extremos y decreciente en el sector 3 y 2 (Figura 5.c2), adoptando una escarpa circular para el 2015 (Figura 5.a)

En un periodo de siete meses (Mayo a Noviembre del 2015): Este periodo de análisis es corto a comparación de los desarrollados anteriormente por lo tanto el análisis de los mismos está representado por deformaciones no mayores a 6 metros, el sector 2 presentó mayor actividad con valores entre 0-6 metros (Figura 5.c1), seguido del sector 1 con deformaciones de 0-2 metros, reduciendo sus valores en el sector 4 y 3 con valores máximos de un metro de deformación, la curva de deformación esta representada por una línea cóncava con mayor deformación en el sector 2 seguido del sector 1 (Figura 5.c2), actualmente la escarpa del deslizamiento en dirección SW-NE, presenta una forma circular o cóncava (Figura 5.a)

La geoforma de la escarpa asociada a los sectores de deformación más activos muestra que durante los primeros seis años de origen del deslizamiento, el lado izquierdo (sector 4) tiene una deformación promedio de 88 metros, geomorfológicamente el plano de ruptura de este sector tiene una apariencia de inclinación moderada por la presencia de surcos perpendiculares al plano de ruptura generados por agentes erosivos, por lo tanto primariamente la escarpa del deslizamiento afecto una zona inestable, expuesta a alta erosión. En los próximos dos años la parte central del deslizamiento (Sector 2 y 3) presenta deformaciones de 68 y 52 metros respectivamente, a pesar de que las características litológicas de ambos sectores son similares, geomorfológicamente el plano de ruptura en el sector 2 presenta una pendiente casi vertical, sin presencia de surcos, lo que explica una menor exposición a vientos del océano Pacífico, por lo tanto los altos valores de deformación son atribuidos a factores gravitacionales que provocaron al mismo tiempo el desplazamiento de áreas inestables como el sector 3. Durante el 2012-2015 (tres años), el lado derecho del deslizamiento (sector 1) tiene una deformación promedio de 92 metros, su desestabilización aparentemente es por efectos gravitacionales e inestabilidad de terreno removido en años anteriores (sector 2 y 3 entre el año 2010-2015). La última etapa de análisis comprende un periodo de siete meses (mayo a noviembre del 2015), el sector 2 ubicado en el extremo derecho de la parte central presenta deformaciones de 3 metros por efectos gravitacionales.

El análisis de la deformación respecto al tiempo en los cuatro periodos de análisis muestra que desde el 2004-2010 la velocidad del sector 4 es de 88m / 6 años, durante el 2010-2012 la velocidad entre el sector 2 y 3 es de 60m / 2 años, entre el 2012-2015 se tiene velocidades de 92 metros en un periodo de tres años y el último periodo de análisis del año 2015 se determina que el sector 1 presenta mayor actividad con velocidades de deformación de 3m / 7 meses (Figura 5.c.3).

DEFORMACIÓN DE LA ESCARPA DEL DESLIZAMIENTO DE SIGUAS ENTRE LOS AÑOS:					DISTANCIAS MÁXIMAS		ZONAS MÁS ACTIVAS		CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS	ZONAS AFECTADAS					
2004 - 2010		2010 - 2012		2012 - 2015 May.		2015 May - 2015 Nov		2004 - 2010			2010 - 2012					
Velocidad		88 m/ 6 años		68 m/ 2 años		92 m/ 3 años		3 m/año		INFRAESTRUCTURA DESTRUIDA						
					2004 - 2010		2010 - 2012		2012 - 2015 May.		2015 May - 2015 Nov		<p>Amenaza con afectar:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- El Canal de regadío del proyecto Majes - Siguas I.</li> <li>- La Carretera Panamericana Sur.</li> <li>- La planta de leche Gloria.</li> <li>- Hectáreas de terreno (usadas para el cultivo de sembríos)</li> </ul>			
<p>SECTOR 1</p>					20 - 30 m.		0 - 10 m.		60 - 120 m.		1 - 2 m.			<p>- Litológicamente esta formado por depósitos cuaternarios conglomerádicos pleistocénicos pertenecientes al origen de un Glacis, el mismo que yace sobre la formación Moquegua conformada por depósitos arcillosos, conglomerados y secuencias ignimbríticas</p>		
<p>SECTOR 2</p>					40 - 50 m.		60 - 80 m.		5 - 10 m.		0 - 6 m.				<p>- Zona erosionada por acción del viento con generación de badlands que forman surcos perpendiculares al plano de ruptura del deslizamiento.</p> <p>- Plano de ruptura expuesto de 30 m de altura, altamente empinado, constantemente se genera el desprendimiento de bloques arcillosos.</p> <p>- Este Sector a comparación del primero presenta menor erosión eólica.</p>	
<p>SECTOR 3</p>					40 - 50 m.		40 - 60 m.		5 - 10 m.		0 - 0.5 m.					<p>- El plano de ruptura de la escarpa del deslizamiento es casi vertical, sin presencia de surcos perpendiculares a la escarpa del deslizamiento</p>
<p>SECTOR 4</p>					80 - 100 m.		30 - 40 m.		15 - 20 m.		0 - 1 m.					
													<p>- Destrucción de muros de contención de SEAL.</p> <p>- Pérdida de hectáreas de terrenos.</p> <p>- Agrietamiento de terrenos, destrucción de muros de concreto.</p> <p>- Abandono de viviendas por alta exposición.</p> <p>- Agrietamiento de terrenos, destrucción de viviendas de material noble, destrucción de hectáreas de terreno</p> <p>- Agrietamiento de terrenos, destrucción de viviendas de material noble.</p> <p>- Pérdida de terrenos de cultivo.</p>			

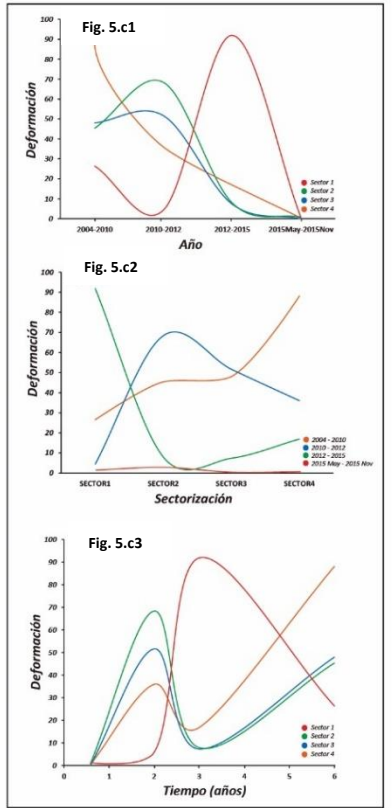
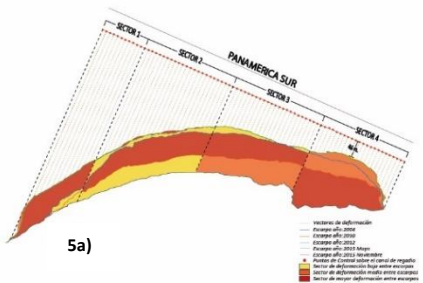


Figura 5: 5a) Sectorización de la escarpa del deslizamiento; 5b) diagrama de frecuencias que muestran las deformaciones de la escarpa en los cuatro periodos de análisis; 5c) Diagramas comparativos que indica los periodos de mayor actividad.

La zona alta del deslizamiento de Sigüas se comporta como una cuenca de recepción, al estar condicionada al desplazamiento de sedimentos por deformaciones diarias de la escarpa; La zona media del material deslizado está formada por estructuras de compresión que explican un escenario de empuje del material gravoso y arenoso, el movimiento de estas estructuras es lento pero de valores cuantitativos vistos en el cartografiado de las imágenes temporales, la zona baja o caída de pie del deslizamiento se caracteriza por tener una mayor inclinación de pendiente, lo que origina bruscas variaciones de desplazamiento representadas por la formación de estriamientos radiales.

Las condiciones geomorfológicas de la zona baja condiciona a un mayor desplazamiento de bloques, Los vectores de movimiento en los dos periodos de análisis (2010-2012, 2012-2015) muestra que entre el 2010 y 2012 se tuvo un desplazamiento de bloques de 76 metros en la zona baja de la masa deslizada, mientras que en los próximos tres años (2012-2015) la masa de la zona media acelera su movimiento a 64 metros/3 años, sin dejar de lado la zona baja con desplazamientos promedios de 103 metros a más.

La deformación máxima de la escarpa en los seis primeros años es de 88 metros en el sector 4, durante el 2010-2012 el deslizamiento tuvo mayor actividad en el sector 2 y 3 con deformaciones de 68 y 52 metros, en el 2012-2015 el lado derecho del deslizamiento es el más activo (sector 1).

La promedios de deformación máxima en los cuatro periodos de análisis muestra que la escarpa del deslizamiento pierde terreno en dirección NE-SW (lado izquierdo a derecho), afectando primero zonas expuestas a alta erosión (sector 4), seguida de sectores afectados por agentes gravitacionales e inestabilidad de masas por desplazamiento de zonas aledañas a sus límites.

Los valores de deformación de la escarpa del deslizamiento en periodos de 6, 2, 3 años y 7 meses muestra intervalos de deformación entre <80-100], <40-80], <60-120], <0-6] metros respectivamente, donde se observa que los valores de deformación en un periodo de dos (2010-2012) y tres (2012-2015) años son altos a comparación de deformaciones alcanzadas en un periodo de 6 años (2004-2010), estos valores explican la inestabilidad por efectos de la infiltración del agua de regadío del Proyecto de Irrigación Majes – Sigüas

Actualmente el sector más activo de la escarpa del deslizamiento (sector 2 y 1) tiene una deformación de 3 metros en un periodo menor a un año, este sector es afectado por terrenos de cultivos cercanos que utilizan un sistema de riego por aspersión. Sin embargo, en este periodo de tiempo, los sectores con deformaciones de 0-1 metro (sector 3,4) son zonas abandonadas sin uso del sistema hídrico y con reducción del caudal del canal de irrigación hasta su cierre permanente por el replanteo de 300 metros de la estructura, los agentes que condicionaban su movimiento años anteriores fueron reducidos y ahora la deformación de la escarpa es afectada principalmente por factores gravitatorios.

## 7.0. MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO

El deslizamiento de Siguas corresponde a un movimiento rotacional retrogresivo dinámicamente activo, que viene siendo monitoreado constantemente por INGEMMET con el uso de tres metodologías (Figura 6).

El monitoreo de este fenómeno activo, se basa en el principio de determinar los cambios en su posición o medición del punto de control, comparación de imágenes, cuantificación del movimiento del suelo, generación de modelos digitales del terreno, etc. Los sitios y puntos de medición se encuentran distribuidos en el hombro y cuerpo del deslizamiento, para ello se han empleado, tres técnicas que permitan obtener información relacionada al movimiento de masas, estas se resumen en la Tabla 1.

TÉCNICA	MÉTODO	RESULTADO	RANGO TÍPICO	PRECISIÓN TÍPICA
Monitoreo geodésico	Estático permanente	Diferencia de coordenadas (3D)	Variable	H: 3 mm +0.1 ppm V: 3.5 mm +0.4 ppm
	RTK	Diferencia de coordenadas (3D)	Variable	H: ±8 mm +0.5 ppm V: ±15 mm +0.5 ppm
Monitoreo con Scanner	Scanner LiDAR	DEM	Variable	4 a 7 mm @ 100 m.
Monitoreo con Imágenes Radar	InSAR	Diferencia de mapas	variable	± >2 cm

Tabla 1. Métodos de monitoreo empleados en los deslizamientos de Siguas.

### 7.1. Monitoreo Mediante GPS Diferencial

Método que permite conocer y cuantificar la magnitud, velocidad y dirección del desplazamiento. Para el monitoreo del deslizamiento de Siguas se han empleado equipos GPS de última generación y de alta precisión.

Para implementar el sistema de monitoreo se tiene distribuido 27 puntos de control en el cuerpo del deslizamiento, a su vez se realizan mediciones en la escarpa con el fin de observar la tasa de desplazamiento. Las mediciones son reiterativas y se realizan mediante de campaña de medición, el presente informe contiene datos de las cinco campañas de registro que se realizaron en el deslizamiento. En la figura 8 se observan la distribución de puntos de control sobre el deslizamiento de siguas (puntos amarillos), Además de puntos de puntos de control (rojos) sobre el canal de irrigación y puntos verdes que representan monumentos construidos sobre la escarpa del deslizamiento, a finales de 2015 (Figura 7).

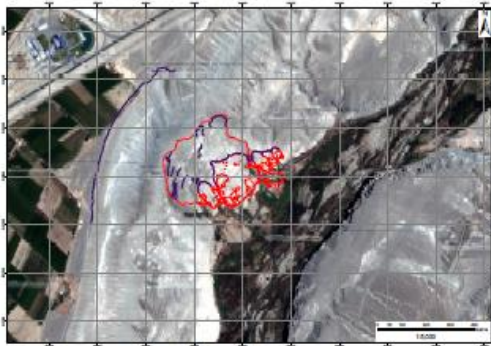


Imagen Satelital, Año 2004: Vista de reactivaciones en la parte baja del Valle del rio Sigüas, se observa el límite del valle.

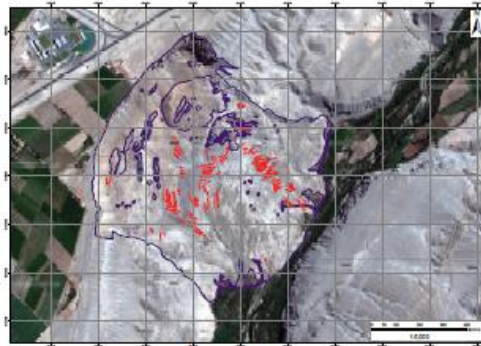


Imagen Satelital, Año 2010: Se muestra el cartografiado de bloques y estrías sobre el cuerpo del deslizamiento.

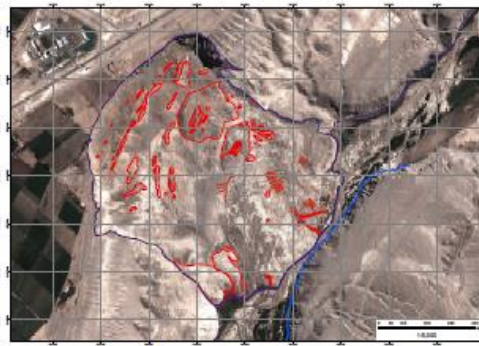


Imagen Satelital, Año 2010: Desplazamiento de las estructuras ya existentes, extension de las dimensiones de la escarpa

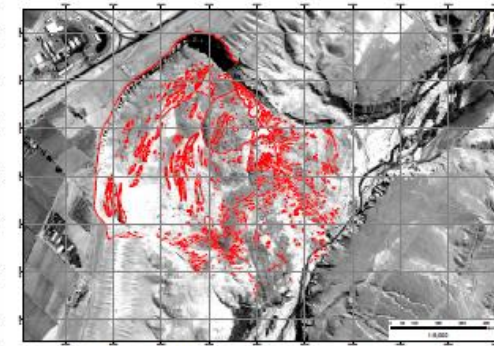


Imagen Aérea, Año 2015: Cartografiado de los bloques desplazados y estriamiento sobre el cuerpo del deslizamiento

Años	ESCARPA			PIE		DESPLAZAMIENTO		
	LONGITUD (m)	ZONAS AFECTADAS		ZONAS AFECTADAS		EXTENSION ESTABILIZADO	GRIETAS	PRESAS
		DISTANCIA (m)	SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )	DISTANCIA (m)	SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )			
2004				90	0.01			
2010	1250	30	41160	355	0.17	200	✓	✓
2012	1350	55	33955	30	0.2	1 km	✓	✓
2015 Mayo	1370	18	20426	8	0.02	1000 m <sup>2</sup>	✓	✓
2015 Nov.	1376	2	1292	1		200	✓	✓

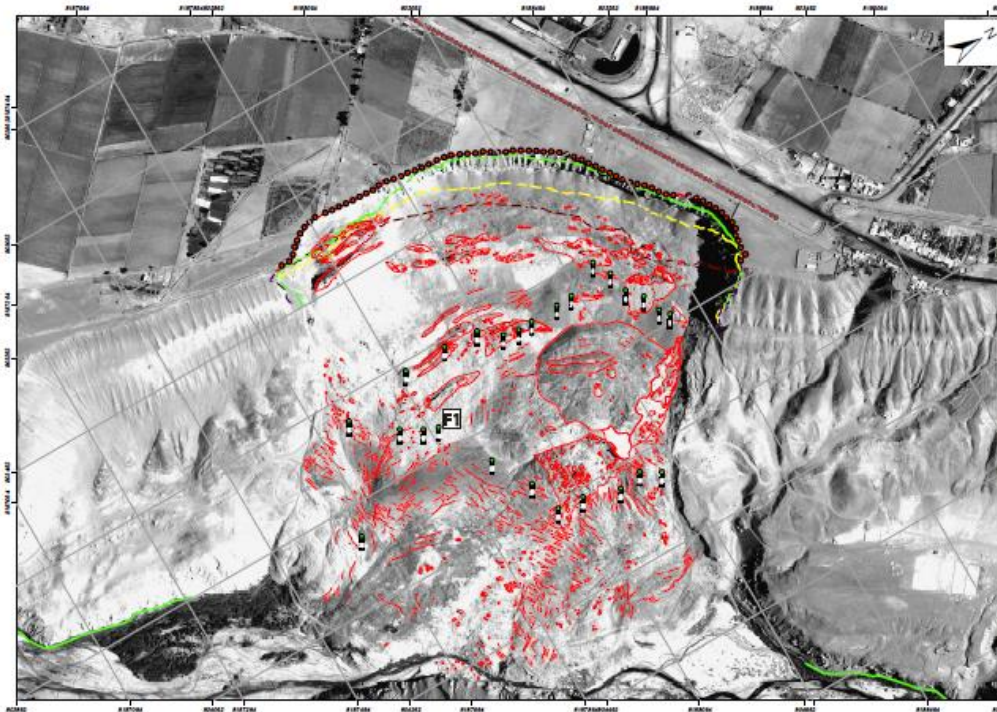


Imagen Satelital, Año 2015: Vista frontal del deslizamiento de Sigüas, se muestra la evolución de la escarpa en el año 2004, 2010, 2012, mayo y noviembre del 2015; Así como los puntos de monitoreo sobre la escarpa, masa y canal de regadío.



Fotografía 1: Vista frontal de ridges sobre el cuerpo del deslizamiento.

Figura 6: Comparación de imágenes multitemporales del deslizamiento de Sigüas, años 2004, 2010, 2012 y 2015.

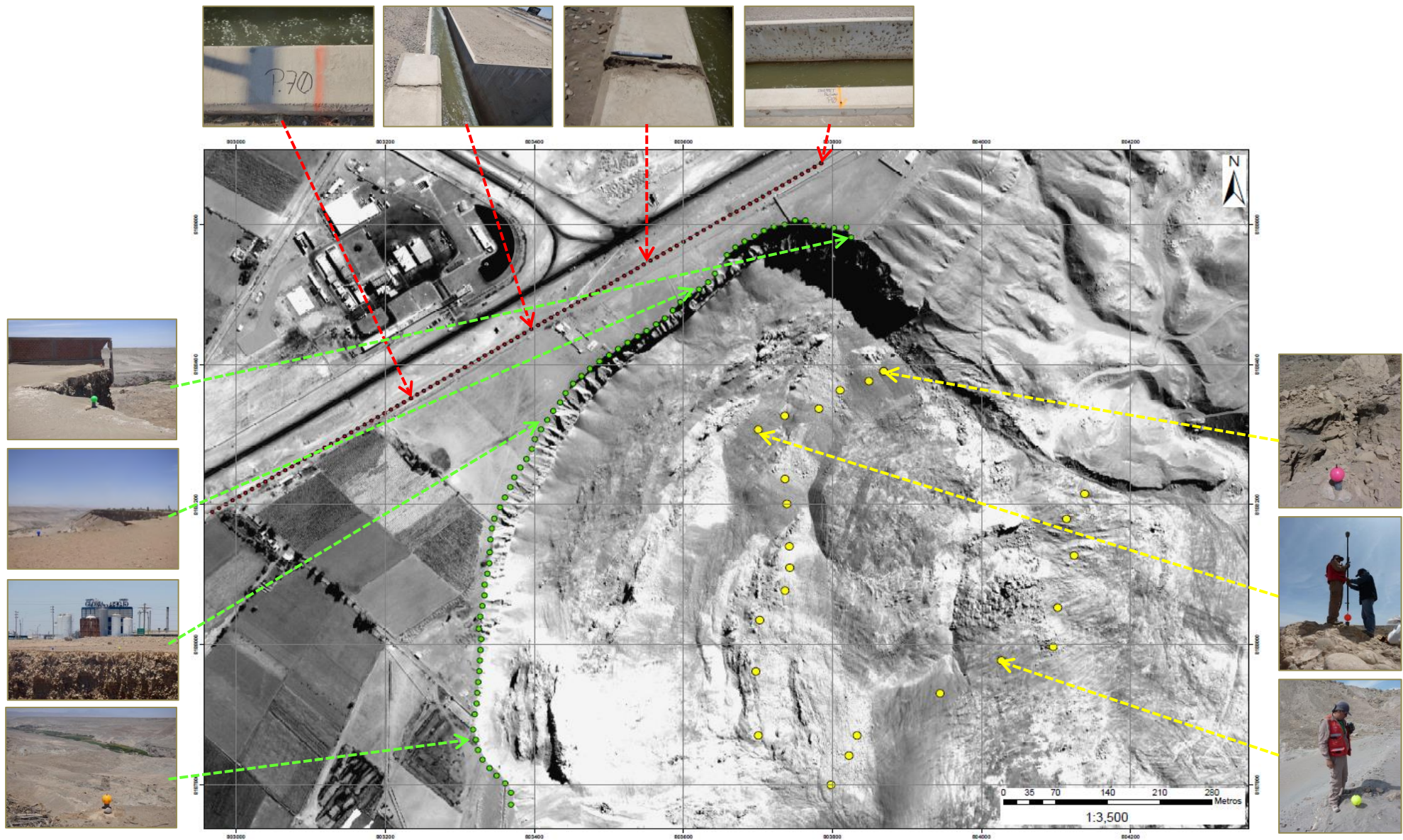


Figura 7: Puntos de control y monitoreo sobre la escarpa y cuerpo del deslizamiento de Sigüas



### 7.1.1. Adquisición de Datos GPS

La adquisición de datos corresponde al periodo de monitoreo desde el día 20 de noviembre del 2015, fecha en la cual se instalaron los puntos de control temporal GPS Diferencial, las primeras mediciones se obtuvieron el día 22 de noviembre de 2015, las siguientes mediciones de reiteraciones se realizaron durante los días, 17 de febrero, 02 de mayo, 26 de julio y el 21 de noviembre del 2016, obteniéndose cinco mediciones en los 27 puntos de control y también se realizó el levantamiento GPS mediante el método cinemático en el borde de la escarpa principal con la finalidad de hacer el seguimiento del avance de esta en el tiempo, se tienen entonces información para un periodo de 12 meses, los cuales describimos en los títulos siguientes. En la foto 21, se muestran fotografías del trabajo de campo empleando el equipo GPS Diferencial Marca Trimble modelo R10 en modo RTK, tomando datos en el cuerpo del deslizamiento.



Foto 21: Medición en campo usando el GPS diferencial en modo RTK, mediciones sobre el cuerpo del deslizamiento.

## 7.1.2. PROCESAMIENTO

### a. Procesamiento de Datos GPS

Se muestran los resultados del procesamiento de los datos registrados de los puntos de control y del levantamiento de la escarpa principal del deslizamiento, correspondiente al periodo entre 22 de noviembre de 2015 al 21 de noviembre de 2016 (12 meses), El punto base de los cálculos, está establecido sobre roca aflorante, que sirve como base de referencia para las corrección en el modo RTK, que consta de un registro de 24 horas a un intervalo de 10 segundos, el cálculo de la coordenada BASE (BGS-Base Geodésica Siguan) se generó mediante el post-procesamiento referida con la estación AREQ estación administrada por el IGS (International GNSS Service), los datos fueron analizados mediante el software Trimble Business Center (TBC) versión 3.5.1, dentro de los parámetros a considerar para el procesamiento fue el Sistema UTM WGS 84, zona 18 Sur. Con estas coordenadas se realizaron las correcciones de los 27 puntos de control temporal, para el cálculo de las coordenadas precisas y las variaciones entre coordenadas.

### b. Puntos GPS en el Cuerpo del Deslizamiento

Para el seguimiento del desplazamiento se calcularon las coordenadas para los 27 puntos de monitoreo y se analizaron en función del tiempo, con el procedimiento como análisis de las series temporales, esta consiste en aproximar mediante regresión lineal o polinomial la tendencia de las coordenadas a través del tiempo, de manera que podamos obtener los movimientos a manera de vectores de velocidad o desplazamiento tanto en la componente horizontal como en la vertical. En las figuras 8-11 se presentan ejemplos de este procesamiento.

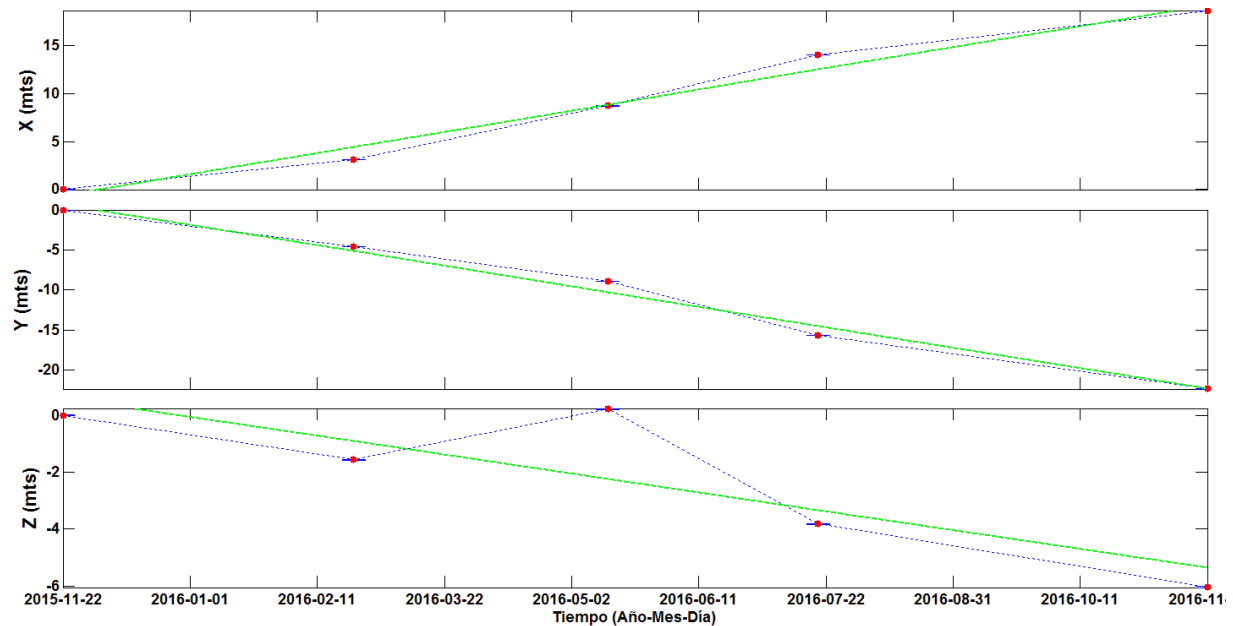


Figura 8. Serie temporal de desplazamiento de las componentes X , Y y Z del punto PI06.

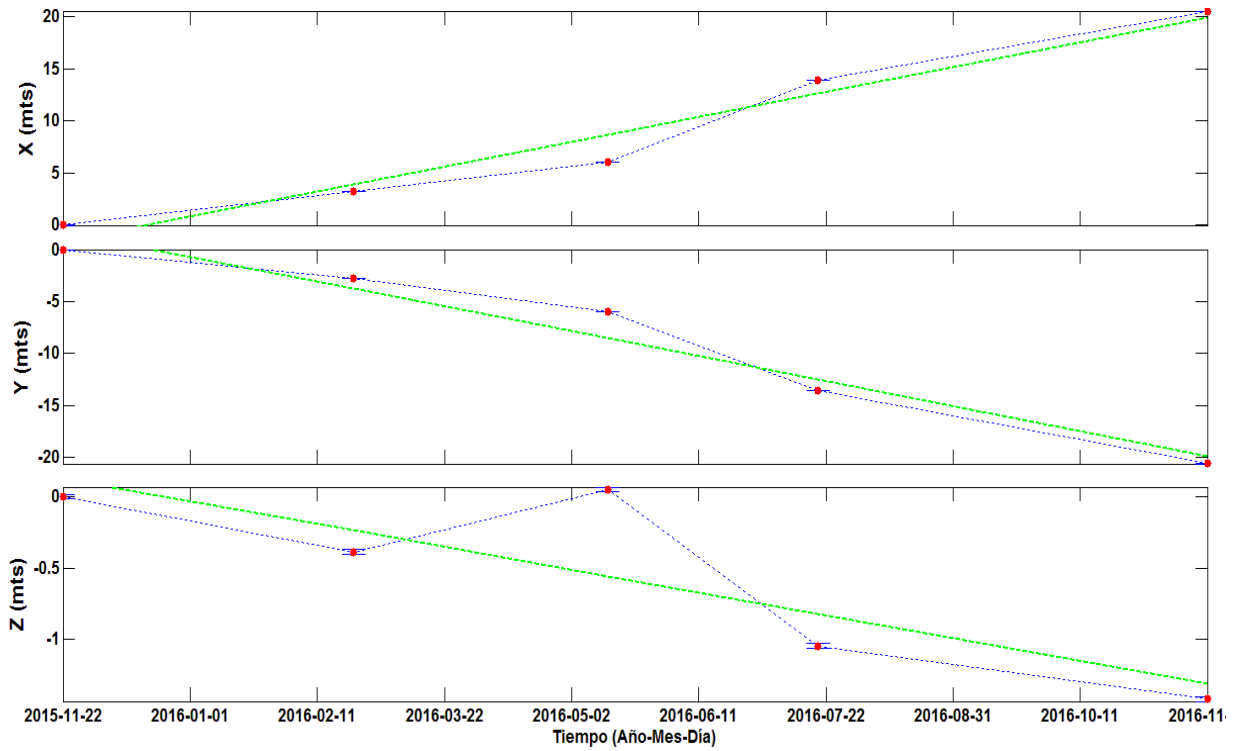


Figura 9. Serie temporal de desplazamiento de las componentes X, Y y Z del punto PI08.

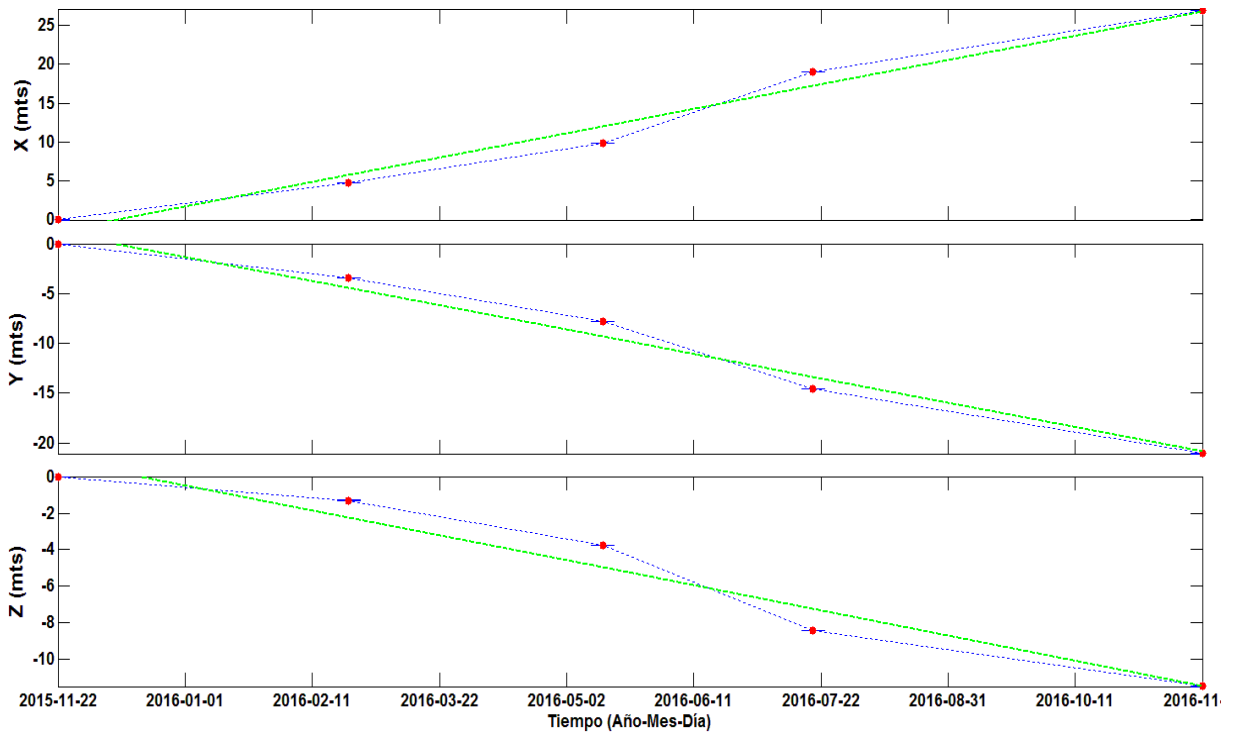


Figura 10. Serie temporal de desplazamiento de las componentes X, Y y Z del punto PI19

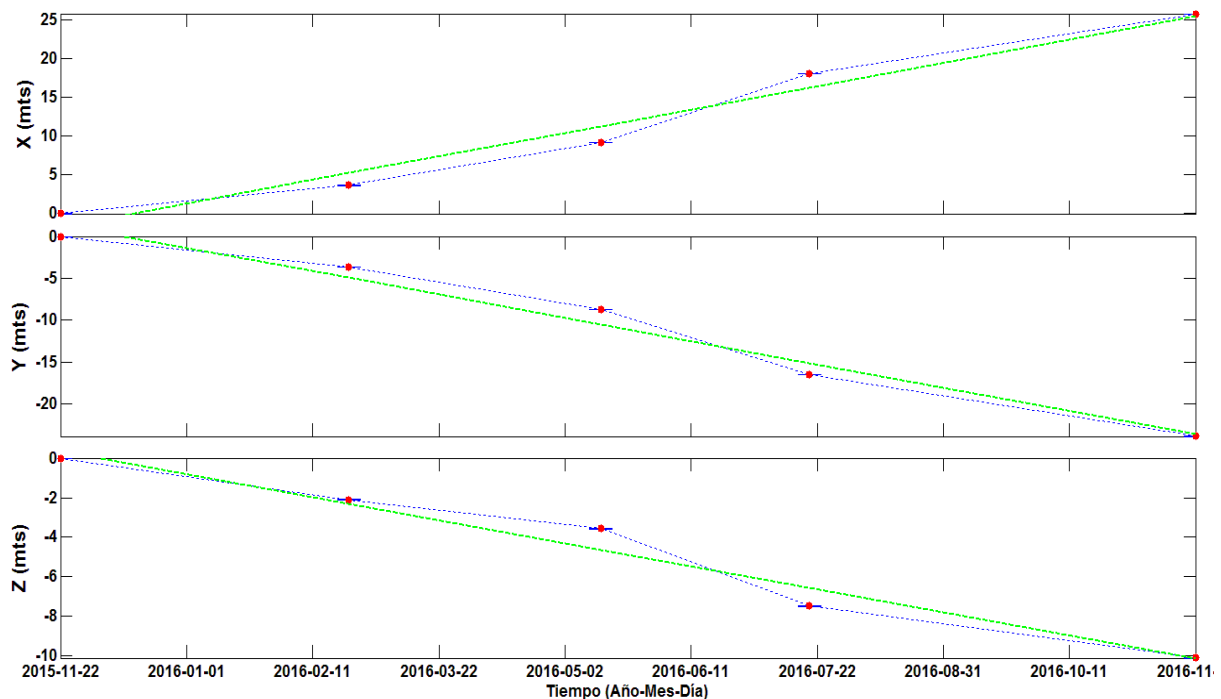


Figura 11. Serie temporal de desplazamiento de las componentes X, Y y Z del punto PI20

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4, estos corresponden a la magnitud y velocidad de desplazamiento de los 27 puntos de control para el periodo comprendido entre 22/11/2015 al 21/11/2016 (12 meses)(tabla 2), así podemos observar que la tasa promedio de velocidad de desplazamiento entre periodo y periodo es entre 2 a 4 m/mes. A continuación se describe el comportamiento del desplazamiento por campañas:

- Periodo 22/11/2015 – 17/02/2016: Los puntos de control evidencian, que el cuerpo deslizando se desplazó entre **2 a 6** metros en dirección de la pendiente de la ladera a una velocidad de 1 a 2 m/mes, mencionar que el punto PI27 se desplazó 20.42 metros a una velocidad de 7.04 m/mes, punto que se ubica en la parte inferior del deslizamiento, lo cual sugiere que la masa deslizando del pie del deslizamiento presentan mayor avance, debido al grado de saturación corroborado con las visitas a campo, se observa filtraciones de agua.
- Periodo 17/02/2016 – 02/05/2016: Se presenta mayor tasa de desplazamiento entre **3 a 8.4** metros en un periodo de 2.5 meses, con una velocidad entre 1 a 3.4 m/mes, probablemente los desplazamientos de este periodo corresponderían a un incremento en nivel de recarga del nivel freático y sucesivamente detonado por el sismo registrado el día 01/04/2016 con una magnitud de 4.4MI cuyo epicentro está a 5 km al noreste del deslizamiento.
- Periodo 02/05/2016 – 26/07/2016: Los puntos de control evidenciaron mayor tasa de desplazamiento con respecto al periodo anterior, se registró un desplazamiento de **6 a 12.9** metros en un periodo de 2.8 meses, la velocidad de desplazamiento fue de 2 a 4.8 m/mes, lo cual estaría estrechamente relacionado a la ocurrencia de sismos, durante este periodo se registraron por lo menos tres (03) sismos ocurridos

el 10 de mayo ( 4.3MI,) y el 04 de julio (4.5 y 4.0 MI), los epicentros se ubicaron entre 25 a 30 km del deslizamiento.

- Periodo 26/07/2016 – 21/11/2016: La tasa de desplazamiento es similar al periodo anterior, se registraron desplazamientos a razón de **7 a 11.8** metros, a una velocidad de 1 a 3 m/mes en un periodo de 3.9 meses. Los altos valores de deformación son atribuidos a la ocurrencia de eventos sismos, durante este periodo ocurrieron tres sismos, el 30 de julio (4.2 MI), el 29 de agosto (4.7 MI) y el 01 de setiembre (5.0 MI), estos eventos están eventos próximos al deslizamiento.

PUNTO CONTROL	DESPLAZAMIENTO TOTAL POR COMPONENTE			VELOCIDAD DESPLAZAMIENTO
	ESTE (m)	NORTE (m)	VERTICAL (m)	m/mes
PI01	14.884	-15.561	-2.242	1.82
PI02	15.311	-16.087	-2.293	1.88
PI03	17.234	-18.893	-2.113	2.17
PI04	17.445	-20.846	-1.584	2.30
PI05	16.371	-19.553	-4.873	2.16
PI06	18.667	-22.351	-6.039	2.47
PI07	19.027	-20.693	-3.162	2.38
PI08	20.520	-20.627	-1.421	2.47
PI09	21.683	-20.578	-0.724	2.53
PI10	22.242	-20.802	0.000	2.58
PI11	22.807	-20.868	-0.859	2.62
PI12	23.696	-21.089	-0.911	2.69
PI13	27.636	-20.730	-1.783	2.93
PI14	28.899	-18.028	0.000	2.89
PI15	19.359	-3.763	0.000	1.67
PI16	22.009	-11.753	-4.107	2.11
PI17	24.947	-15.051	-4.781	2.47
PI18	29.083	-26.737	-10.114	3.35
PI19	26.982	-21.058	-11.491	2.90
PI20	25.755	-23.839	-10.116	2.97
PI21	35.387	-13.108	-9.918	3.20
PI22	30.434	-20.343	-3.391	3.10
PI23	29.543	-21.111	-3.129	3.08
PI24	27.825	-20.291	-3.725	2.92
PI25	19.636	-15.263	-5.719	2.11
PI26	14.646	-19.504	-3.275	2.07
PI27	10.662	-17.417	-0.468	1.73

Tabla 2: Muestra los valores totales de desplazamiento de los puntos de monitoreo para el periodo desde el 22/11/2015 al 21/11/2016.

### c. Avance de la Escarpa Principal con GPS Cinemático

El cartografiado de la escarpa principal del deslizamiento de Sigwas se realizó desde el inicio del monitoreo con levantamiento continuo mediante GPS RTK, este trabajo ha mostrado un comportamiento retrogresivo, se han observado áreas con mayor y menor tasa de desplazamiento lo cual sugiere que la escarpa presenta áreas de mayor susceptibilidad al deslizamiento debido a su composición litológica. En la figura 12, se presenta una serie temporal de la zona de mayor avance de la escarpa principal. Se nota claramente que el mayor avance fue en el mes de marzo de 2016, mientras que para el resto de tiempo las velocidades de avance se mantienen casi constante.

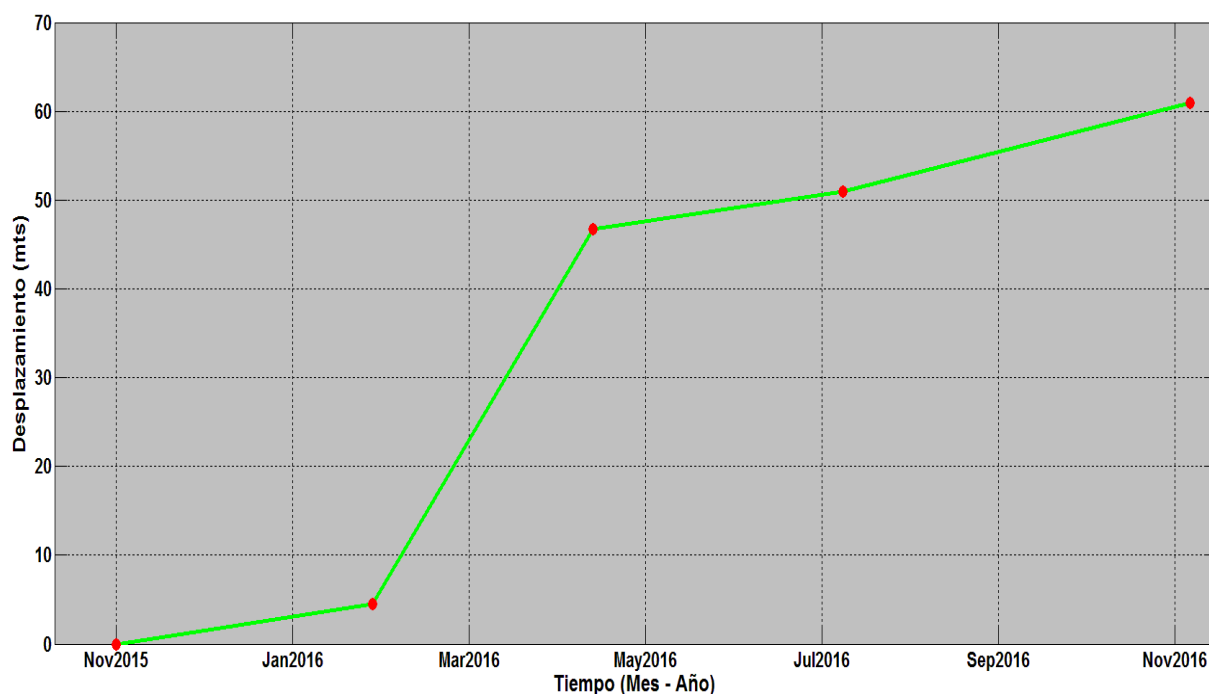


Figura 12. Serie temporal de desplazamiento de la escarpa principal del deslizamiento de Sigwas, periodo del 22/11/2015 al 21/11/2016.

### 7.1.3. RESULTADOS DE MONITOREO

Los resultados del monitoreo geodésico de los puntos de control indican que existen dos zonas con diferentes dinámicas de movimiento, una corresponde a la escarpa principal que avanza por caída y el cuerpo del deslizamiento que avanza por movimiento rotacional retrogresivo.

El mapa de vectores de desplazamiento (figura 13), correspondiente a un periodo de 12 meses de monitoreo de los 27 puntos de control. Podemos observar que el grupo de puntos del PI01 al PI14 se desplazaron entre 21.53 a 34.54 metros a una velocidad de 1.82 a 2.93 m/mes, el grupo de puntos de control del PI15 al PI25 evidenciaron un desplazamiento entre 19.72 a 39.50 metros, su tasa de velocidad fue entre 1.67 a 3.35 m/mes y para el grupo de puntos PI26 y PI27 mantuvieron un desplazamiento de 20.42 a 24.39 metros a una velocidad de 1.73 a 2.07 m/mes, lo valores obtenidos significan mayor deformación horizontal y vertical, la dirección de desplazamiento para los puntos de control es en dirección sureste, es decir en el sentido de la pendiente de la ladera. A partir del mapa de velocidades podemos determinar que el desplazamiento es en bloque, las magnitudes y dirección de movimiento son similares en cada punto.

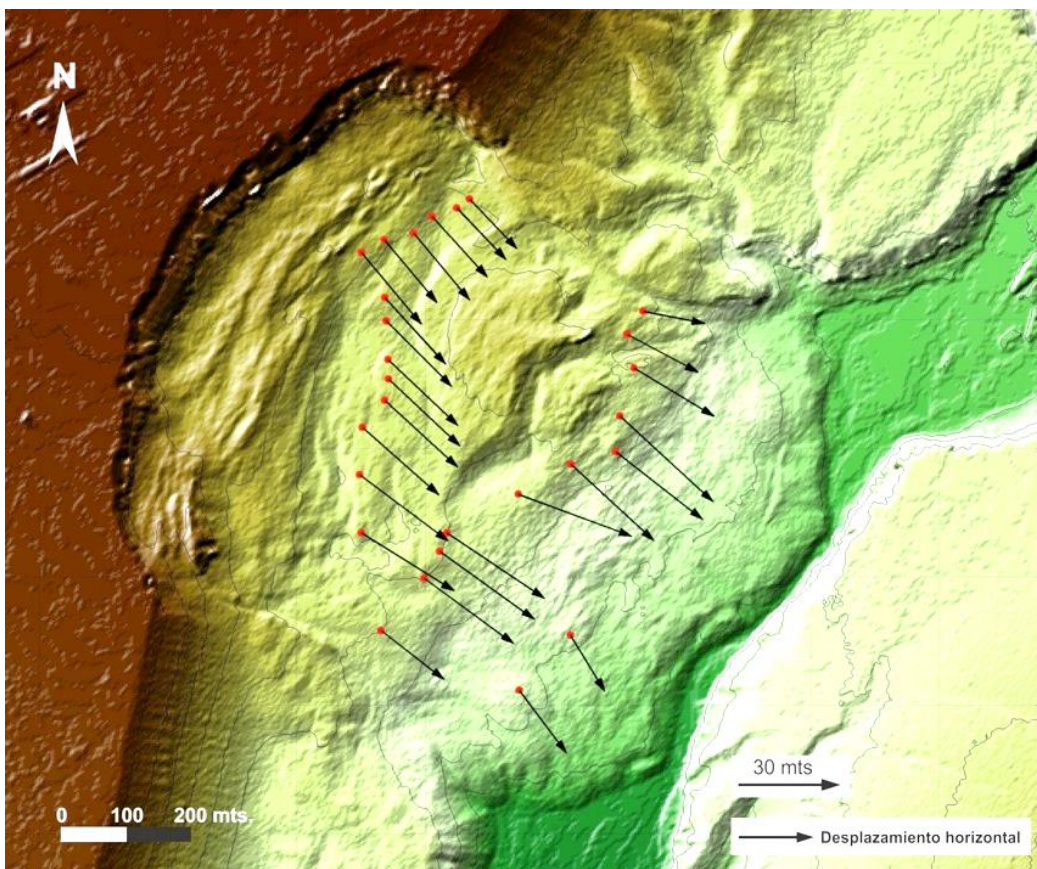


Figura 13. Mapa de desplazamiento, obtenidos para el deslizamiento de Sigüas durante el periodo de 12 meses (22/11/2015 al 21/11/2016).

### a. Dinámica de la Escarpa Principal

El deslizamiento de Sigüas, es un movimiento en masa geodinámicamente activo, cuya escarpa principal tiene 70 metros de salto y 1.4 km de extensión, la misma que amenaza con destruir la panamericana sur e infraestructura adyacente. El estudio de monitoreo realizado desde finales del 2015, muestra que la escarpa del deslizamiento no avanza a distancias constantes a lo largo de sus extensiones, característica que representa a un deslizamiento rotacional, de escarpa circular. Esta variación de deformación dio lugar a la división de 4 sectores de estudio a lo largo de la escarpa principal, cada uno de los cuales compromete infraestructura adyacente a velocidades de deformación distinta.

La figura 14, muestra los sectores y la infraestructura afectada por la escarpa principal del deslizamiento. El sector 1 afecta directamente la caseta de SEAL y el centro poblado “El Alto” (ubicado a 165 metros al lado izquierdo del sector 1); el sector 2 y 3 (parte central de la escarpa principal del deslizamiento de Sigüas) afectan principalmente al canal de irrigación (2 metros de la escarpa principal), la Panamericana Sur (a 48 metros de la escarpa principal en el sector 2) y la Planta de leche (73 metros), mientras que los terrenos de cultivo en el lado derecho de la escarpa principal son afectados por el sector

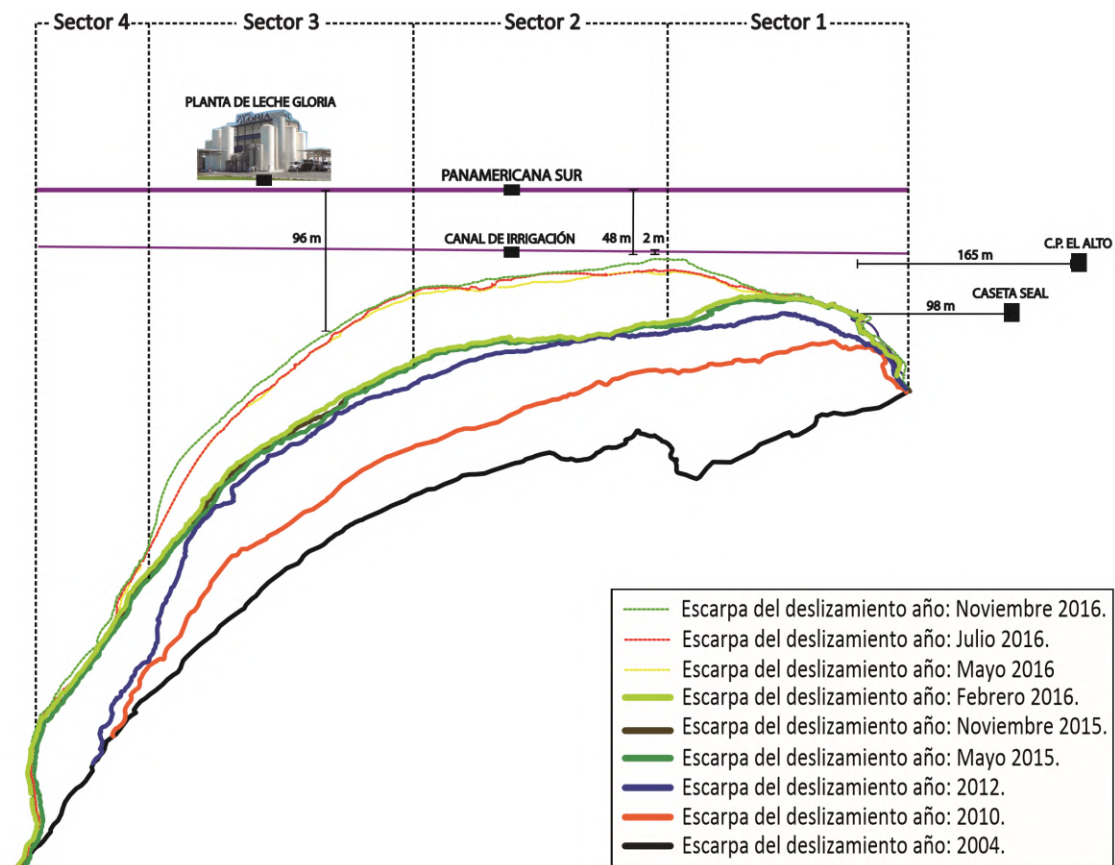


Figura 14. Distancias de la escarpa principal del deslizamiento (en los cuatro sectores de división) a Infraestructura comprometida (22/11/2015 al 10/02/2017).



#### - Dinámica de la Escarpa Principal (Panamericana Sur)

Haciendo el seguimiento del escarpe principal con GPS Cinemático, se ha identificado que la zona de mayor desplazamiento corresponde a la parte central de la escarpa, durante el periodo 22/11/2015 a 17/02/2016 se desplazó entre 1 a 6 metros, para el periodo entre 17/02/2016 al 02/05/2016 la escarpa se desplazó entre 3 a 56.34 metros (figura 15), la aceleración de ese periodo coincide con el sismo ocurrido el día 01/04/2016 con magnitud de 4.4 MI reportado por el IGP, su epicentro se localizó a 5 km al noreste del deslizamiento, se considera que este podría ser el detonante de la aceleración de deslizamiento. Para los demás periodos la tasa de desplazamiento se registró entre 1 a 7 metros. El avance de la escarpa hasta el último periodo (10/02/2017) de monitoreo mantuvo una distancia de 2 metros con respecto del canal de irrigación Majes – Siguas y una distancia de 48 metros de separación entre la escarpa y la Panamericana Sur.

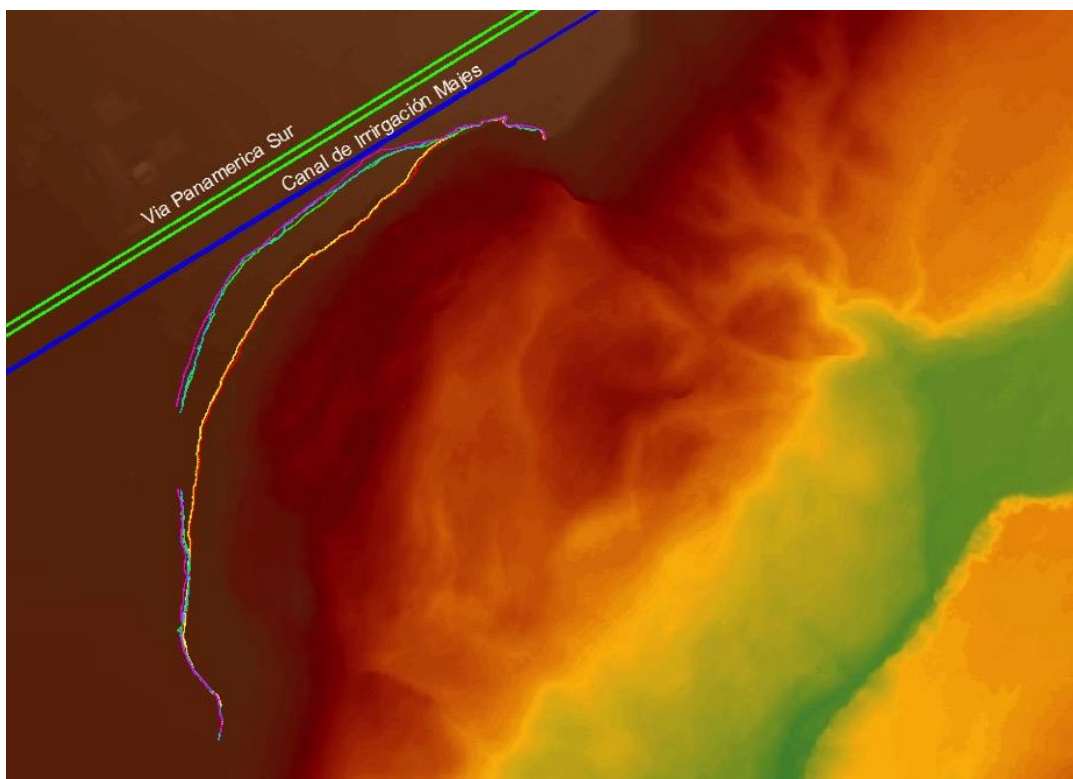


Figura 15. Mapa de desplazamiento de la escarpa principal de Siguas: Línea roja corresponde al periodo del 22/11/2015 al 21/11/2016, la línea color amarillo corresponde al avance de la escarpa hasta el 17/02/2016, la línea color verde avance hasta el 02/05/2016, la línea de color celeste es el avance actualizado hasta el 26/07/2016, finalmente la línea color magenta corresponde al avance del deslizamiento hasta el 21/11/2016.

#### - Dinámica de la Escarpa Principal (Poblado “El Alto”)

El Poblado **El Alto** ubicado a 165 metros de la escarpa principal del deslizamiento, en la zona de influencia controlada por el sector 1, hasta la fecha tiene una deformación constante de 50 cm/mes, Por lo tanto:

- Según el análisis multitemporal de imágenes satelitales y el monitoreo GPS en campo, las velocidades de deformación en el **Sector 1** de la escarpa del deslizamiento a condiciones normales y extremas son de 15 y 20 metros anuales respectivamente.
- El pronóstico de afectación elaborado en base al monitoreo del deslizamiento muestra que a **condiciones extremas** sería afectado en el **2024**, mientras que a condiciones normales el poblado El Alto sería afectado a mediados del año 2027.

## 7.2. Monitoreo con scanner LiDAR.

El uso del escáner LiDAR es un tipo de monitoreo que se viene realizando desde finales de 2015, para el monitoreo a detalle centimétrico del desplazamiento y deformación del deslizamiento de Sigüas. Los datos se obtienen permanentemente a través de 5 tomas por cada campaña de campo trimestral, sobre el deslizamiento de Sigüas. De las cuales 3 de ellas tienen bases estables con vista frontal al deslizamiento de Sigüas y dos son puntos temporales sobre ambos flancos de la escarpa principal del deslizamiento.

En la foto 22, se observa el trabajo que se viene realizando para la adquisición de información con escáner LiDAR, sobre uno de los bases estables de escaneo LiDAR.



Foto 22: Escaneo LiDAR del deslizamiento de Sigüas.

### 7.3. Monotireo con Imágenes Radar.

El software usado para el procesamiento y cálculo de los interferogramas es el SARSCAPE, con el método de análisis D-INSAR/Amplitud Tracking, para las correcciones topográficas se empleó un DEM con tamaño de pixel o resolución espacial de 1.5 metros, que sirve para simular la componente topográfica (K. Gonzales, 2014). Se combinaron las tres imágenes satelitales y los resultados son interferogramas como el mostrado en la figura 16, en donde se puede ver la incoherencia en la mayor parte del deslizamiento, reconociendo en la zona central evidencia de deformación, estos interferogramas requieren de un procesamiento más que veremos en el capítulo de resultados.

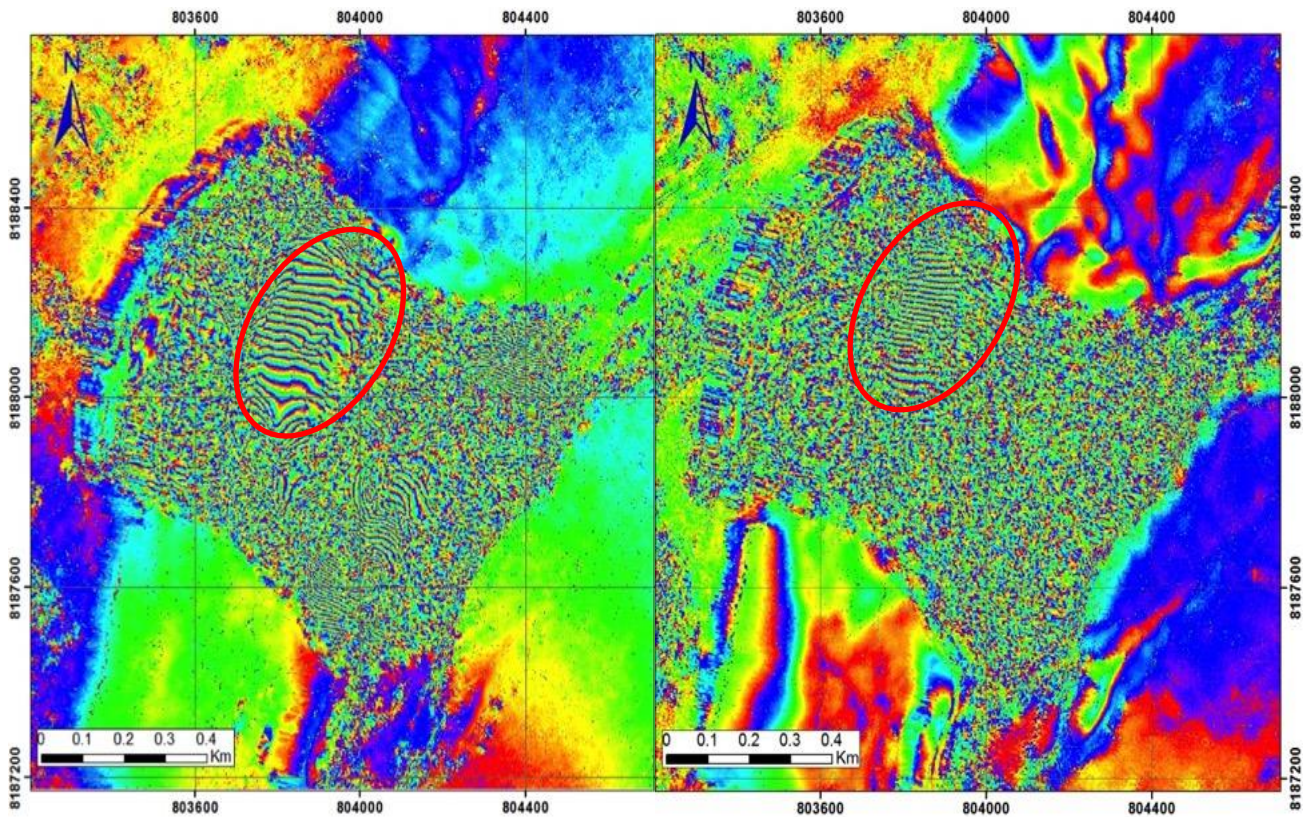


Figura 16. Interferogramas obtenido de la combinación de las imágenes de radar 30627-30961-48192, A). Combinación de imágenes 30627-30961 y B). Combinación 30961-48192, para los deslizamientos de Siguas a través de "Imágenes satelitales TERRASAR-X proporcionadas por el CNOIS, en el marco del Convenio OFFSET Perú-AIRBUS D&S y procesadas por el INGEMMET".

## CONCLUSIONES

1. El deslizamiento de Siguas es un movimiento en masa rotacional retrogresivo dinámicamente muy activo y de movimiento lento y moderado según la tabla de clasificación de Cruden y Varner, cuya velocidad de deformación en la escarpa principal del deslizamiento, actualmente supera los 3 metros de deformación mensual.
2. La inestabilidad de los taludes de la margen derecha del río Siguas, sector El Zarzal, son producto de la infiltración de agua de regadío del Proyecto de Irrigación Majes – Siguas I. Tanto en el valle del río Siguas como el del río Vitor, se encuentran evidencias de numerosos deslizamientos y avalanchas cuyas causas son atribuidas a las aguas de infiltración de proyectos de irrigación.
3. El desplazamiento de bloques del año 2010 y 2012, muestra una mayor dinámica de movimiento en la zona baja del deslizamiento, con desplazamientos de 35 metros anuales.
4. Las deformaciones máximas del deslizamiento se produjeron en el periodo 2010-2012, periodo en el que se tuvo la mayor dinámica en la evolución del deslizamiento; afectando la parte central de la escarpa del deslizamiento (sectores 2 y 3) con 60 metros de desplazamiento. El mayor aporte de sedimentos sobre la masa deslizada generó un mayor avance de las estructuras y bloques en la zona baja de la masa deslizada.
5. Actualmente la mayor dinámica de deformación de la escarpa principal se da en la parte central del deslizamiento (sector 2 y 3), con velocidades de deformación de 1 a 3 metros mensuales bajo condiciones normales. Sin embargo, a condiciones extremas (ocurrencia de sismos) llegó a tener deformaciones de 54 metros en un trimestre
6. La escarpa principal durante el periodo 17/02/2016 al 02/05/2016 (2.5 meses) experimento la mayor tasa de desplazamiento de 56.34 metros, que podría estar asociado al sismo del 01/04/2016 con epicentro a 5 km al noreste del deslizamiento de siguas. Para los demás periodos de monitoreo la escarpa se desplazó entre 6 a 7 metros.
7. Según los pronósticos de avance de la escarpa principal del deslizamiento a condiciones normales, el canal de irrigación sería afectado en Julio del 2017 y a condiciones extremas en enero del 2017 (Según datos de deformación máxima de febrero a mayo del 2017 (18m/mes)). Sin embargo la tasa de deformación disminuyó el último trimestre del año, alargando el pronostico de afectación de infraestructura comprometida a condiciones extremas para Mayo a Abril de 2017.
8. Los puntos sobre el cuerpo del deslizamiento identificaron un desplazamiento casi constante de la parte baja del deslizamiento, siendo estos desde 19.72 a 37.73 metros a una velocidad promedio de desplazamiento entre 1.67 a 3.35 m/mes, la tasa de hundimiento de los puntos fue -72.4 cm hasta -11.49 metros, como se observan en las gráficas de series de tiempo.
9. La aceleración durante ciertos periodos de monitoreo en el proceso de desplazamiento resulta de una combinación de factores tectónicos, hidrogeológicos, litológicos y humanos, la pendiente del suelo, descenso e incremento del nivel freático del agua por

riego no controlado y la acción de la gravedad, que desencadenan en suelos poco consolidados grandes áreas de desplazamiento, como es el caso de Sigwas.

10. El deslizamiento de Sigwas, por sus características dinámicas es de **Peligro Muy Alto**, cuyo avance y cercanía amenaza con destruir infraestructura del canal del proyecto de irrigación Majes Sigwas I, la Carretera Panamericana Sur (Km 920+000 – 921+400), la Planta de Leche Gloria, terrenos de cultivo e infraestructura agrícola (**Riesgo Muy Alto**). Por lo tanto, el deslizamiento de Sigwas y su área de influencia se considera en **Peligro Inminente**.
11. INGEMMET continúa con las investigaciones y el monitoreo permanente de este deslizamiento. Se está programando trabajos de hidrogeología y afinar la dinámica del deslizamiento, para determinar y proponer las medidas correctivas necesarias.
12. En ambas márgenes de los ríos Sigwas y Vitor se aprecian cicatrices de antiguos y recientes deslizamientos y avalanchas que afectaron/afectan ambos valles. Estos eventos fueron detonados por grades sismos y/o infiltraciones de aguas de proyectos de regadío sobre las pampas adyacentes.
13. El Centro Poblado “El Alto” está ubicado a 165 del la escarpa principal del deslizamiento en el sector 1 (velocidades de deformación entre 0.4 a 0.5 metros mensuales), de continuar la deformación y presentarse cambios drásticos en los factores geológicos que condicionan en comportamiento del deslizamiento, su afectación es a **mediano plazo**.
14. Los planes de gestión para la reducción del movimiento del deslizamiento, son factibles a mediano o largo plazo. Actualmente el deslizamiento por sus dimensiones, características geológicas e infraestructura involucrada no puede disminuir radicalmente su movimiento a corto plazo.

## **RECOMENDACIONES**

1. Continuar con el monitoreo permanente del deslizamiento (a cargo de INGEMMET, el mismo que podría ser complementado por el GORE Arequipa o AUTODEMA, previa coordinación).
2. Continuar con el monitoreo permanente de la escarpa principal del deslizamiento para controlar permanentemente las tasas de deformación de los sectores de división estudiados, a través de los cuales se realizará de ser necesario, gestiones de reubicación del poblado Alto Sigwas a mediano plazo.
3. El colapso del canal de Irrigación ubicado a 2 metros de la Panamericana Sur puede servir como estructura de alerta para el cierre definitivo del sector afectado de la Panamericana Sur
4. Cambiar el modo de regadío en el área de influencia del deslizamiento (para determinar el área de influencia se necesitan los estudios hidrogeológicos complementarios que sugiere INGEMMET). Se recomienda el riego por goteo. Este método de regadío implica también cambio del tipo de cultivo (con cultivos que requieran menos agua)

5. Con lo anterior se deprimiría la napa freática (estudios complementarios de hidrogeología pueden proporcionar la cantidad de agua a reducir)
6. Deprimir la napa freática con estaciones de bombeo también es usual. Pero, se necesita más información para: colocar la batería de pozos, profundidad del pozo, etc. El agua bombeada puede llevar a zonas alejadas del deslizamiento para de esta manera ampliar el área agrícola (siempre y cuando se ubiquen en zonas donde la posibilidad de deslizamientos sea nula. Este método es costoso, pero sería bueno hacer cálculos de costo/beneficio para su aplicación.
7. Monitorear la margen derecha e izquierda del valle del río Siguan, para ubicar zonas con posibles deslizamientos.
8. El Ministerio de Transportes, debe tener un plan de contingencia para cambiar el trazo de la Carretera Panamericana Km 920+000 – 921+400, para que de esta manera el tráfico no se interrumpa, en caso de que el deslizamiento la afecte.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Araujo G., Valderrama P., Taipei E., Huaréz C., Díaz J., Miranda R.(2016), Dinámica del deslizamiento de Siguan, distrito Majes y San Juan de Siguan, provincias Caylloma y Arequipa, Informe Técnico N° A6715, INGEMMET, 44p
- Acosta J. (1968), Geología del Cuadrángulo de Aplao. INGEMMET, Boletín, N°25:52p.
- Lionel, F. Valenzuela, G. Carrasco, S.(1997) - Estudio Geodinámica de la cuenca de los ríos Quilca, Sihuas y Vitor. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 10,249pKosaka, R. Palza,H.(2002) - Estudio Geodinámica y Evaluación de peligros de las localidades de Viraco,Machahuay y Pampacolca. Proyecto PER 98/018 PNUD - INDECI, Convenio UNSA - INDECI, Arequipa,139p.
- Marocco R. (1984)- Dynamique du remplissage dum basin intramontagneux cénozoïque andin,laboratoire
- Toledo, H. Ticona, T. (2007) - Plan de mitigación de los deslizamientos producidos por efecto de la saturación en los terrenos de la irrigación Majes. Segunda Especialidad en gestion para la prevencion y atención de desastres y desarrollo sostenible, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 106p.
- Vargas, L.(1990) – Geología del Cuadrángulo de Arequipa. INGEMMET, Boletín, N°24:78p.
- Galdós, J.(2007) - Geomorfología de la zona de Sihuas. Tesis de bachiller, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 37p.
- S. Uhlemann, A. Smith , J. Chambers , N. Dixon , T. Dijkstra , E. Haslam , P. Meldrum A. Merritt D. Gunn , J. Mackay (2015) - Assessment of ground-based monitoring techniques applied to landslide investigations, The British Geological Survey, Elsevier, open article 439-451,14p.
- Elena Kiseleva , Valentin Mikhailov , Ekaterina Smolyaninova Pavel Dmitriev ,Vasily Golubev , Elena Timoshkinaa, A. Hooperb, S. Samiei-Esfahanyc, R. Hanssen ,(2014) -PS-InSAR monitoring of landslide activity in the Black Sea coast of the Caucasus ,Elsevier, open article 405-413,10p.