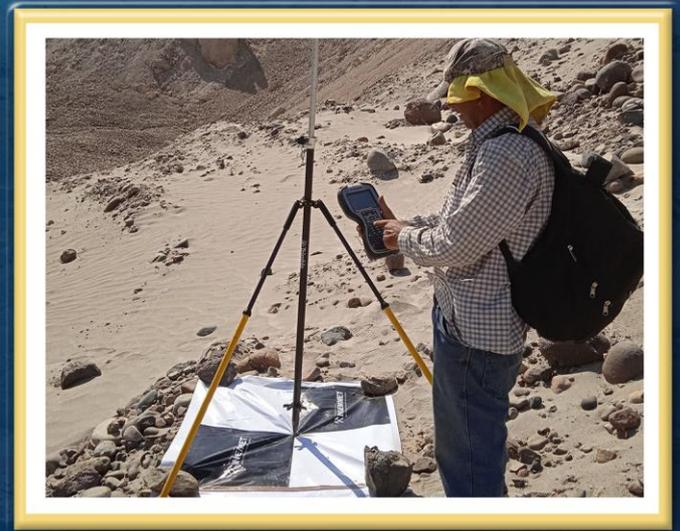


DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7425

MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO DE ALTO SIGUAS PERIODO 2022

Departamento Arequipa
Provincias Caylloma - Arequipa
Distritos Majes - San Juan de Sigwas



SETIEMBRE
2023

MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO DE ALTO SIGUAS PERIODO 2022

Distritos Majes - San Juan de Sigwas, provincias Caylloma - Arequipa, departamento de Arequipa

Elaborado por la Dirección de Geología
Ambiental y Riesgo Geológico del INGEMMET

Equipo de investigación:

Luis Albinez

Angella Zegarra

Dulio Gómez

Joseph Huanca

Fredy Perez

Referencia Bibliográfica

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2023). Monitoreo del deslizamiento de Alto Sigwas periodo 2022, distritos Majes - San Juan de Sigwas, provincias Caylloma - Arequipa, departamento Arequipa. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7425, 26 p.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	4
1.1 Aspectos generales	4
1.1.1 ANTECEDENTES	4
1.1.2 UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD	5
1.1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO	6
2 MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO DE SIGUAS	9
2.1 Toma y procesamiento de datos	9
2.1.1 GEODESIA.....	9
2.1.2 INSUMOS FOTOGRAFÍAS	14
2.1.3 FOTOINTERPRETACION	14
2.1.4 COMPARACIÓN DE DEMs	18
2.1.5 COMPARACIÓN DE PERFILES TOPOGRÁFICOS	19
2.2 Interpretaciones	21
2.2.1 DESPLAZAMIENTOS DEL CUERPO	21
2.2.2 AVANCE DE LA CORONA	22
2.2.3 AVANCE DEL PIE	22
3. CONCLUSIONES	24
4. RECOMENDACIONES	25
5. BIBLIOGRAFÍA	26

1 INTRODUCCIÓN

La irrigación de las pampas de Majes (Arequipa), es una de las áreas agrícolas más importantes del sur de Perú cuyo inicio se remonta al año 1983 (Martínez, 2016). Con el tiempo, su desarrollo (riego) provocó una serie de movimientos en masa de tipo deslizamientos, avalanchas y otros, en la margen derecha del Valle del río Sigwas; desde la década de los 90 hasta la actualidad. Los principales factores condicionantes y/o desencadenantes de los movimientos en masa que ocurren actualmente, son la infiltración de agua proveniente de las actividades de regadío de la irrigación Majes (Martínez, 2016; Lacroix et al., 2020), que actúa incrementando los volúmenes de agua en las “napas freáticas” y su posterior surgencia por los estratos permeables que afloran la margen derecha del valle; la litología y comportamiento geomecánico de materiales conglomeráticos y areno-limosos poco competentes (Araujo et al., 2016), y las laderas con fuertes pendientes.

El deslizamiento de Alto Sigwas, es uno de los más desarrollados y destructivos del Valle de Sigwas. Desde su activación, en el año 2005, ocasionó pérdidas de terrenos de cultivo e infraestructura pública y privada en los distritos de Majes (provincia de Caylloma) y San Juan de Sigwas (provincia de Arequipa).

A raíz de las emergencias generadas por la actividad del deslizamiento de Alto Sigwas y por ser una zona con eventos geológicos activos de interés científico, el INGEMMET, como ente técnico-científico especializado, mediante su Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, realiza su monitoreo temporal, generando informes sobre su evolución.

El presente estudio tiene por finalidad dar a conocer el estado de la actividad del deslizamiento de Alto Sigwas a través de la información obtenida del monitoreo realizado durante el 2022. Este informe describe la retrogresión de su escarpe principal hacia zonas con presencia de infraestructura, terrenos de cultivo y población y el desplazamiento de la masa deslizada hacia el río Sigwas.

1.1 Aspectos generales

1.1.1 ANTECEDENTES

Sobre el monitoreo que el INGEMMET viene realizando en el deslizamiento de Alto Sigwas se puede citar:

- a) En el año 2016 se emitió el primer informe técnico N°A6715: Dinámica del deslizamiento de Sigwas, el cual sirvió de sustento para la declaratoria de estado de emergencia de los distritos afectados en ese mismo año.
- b) En el año 2017 se emitieron los informes técnicos N°A6748: Dinámica y monitoreo del deslizamiento de Sigwas y N°A6772: Área de influencia del deslizamiento de Sigwas y geodinámica del Valle. A solicitud del Ministerio de Transporte y Comunicaciones para que sirva como base en la decisión de la construcción de la vía alterna de un tramo de la Carretera Panamericana Sur, mediante el oficio Nro. 34872017-MTC/25.
- c) A inicios del año 2020 se publicó el informe técnico N°A7032: Monitoreo del Deslizamiento Alto Sigwas. Periodo 2018-2019. A pedido del Gobierno Regional de Arequipa y la Autoridad Autónoma de Majes en respuesta a los oficios de solicitud N°180 – 2019-GRA/ORDNDC, N°1225 – 2019-GRA-PEMS-GE-GGRH/SGOM, N° 113 – 2020-GRA-PEMS-GE-GGRH/SGOM.

- d) En octubre de 2021 se publicó la opinión técnica N°005-2021: Monitoreo Geodésico y Fotogramétrico del Deslizamiento de Alto Siguas. A solicitud de la Municipalidad Distrital de Majes mediante OFICIO N°0560-2021-GM/MDM.
- e) En febrero de 2022 INGGEMMET publicó el informe técnico N°A7224. Monitoreo del deslizamiento de Alto Siguas periodo 2021, distritos de Majes y San Juan de Siguas, provincias de Caylloma y Arequipa, departamento de Arequipa. Lima. Este trabajo describe el resultado del monitoreo realizado entre abril y noviembre de 2021, concluyendo que el deslizamiento continúa muy activo.

1.1.2 UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD

El deslizamiento de Alto Siguas se encuentra en la margen derecha del Valle de Siguas (figura 1 y cuadro 1), entre los distritos de Majes de la provincia de Caylloma y San Juan de Siguas de la provincia de Arequipa. Al noroeste de su corona se encuentran la carretera Panamericana Sur y la planta de leche Gloria, al norte, el centro poblado de Alto Siguas.

Cuadro 1. Coordenadas del deslizamiento, zona 1.

COORDENADA CENTRAL			
UTM - WGS84 - Zona 18S		Geográficas	
Este	Norte	Latitud	Longitud
803853	8188020	16°22'12"S	72°09'21"O

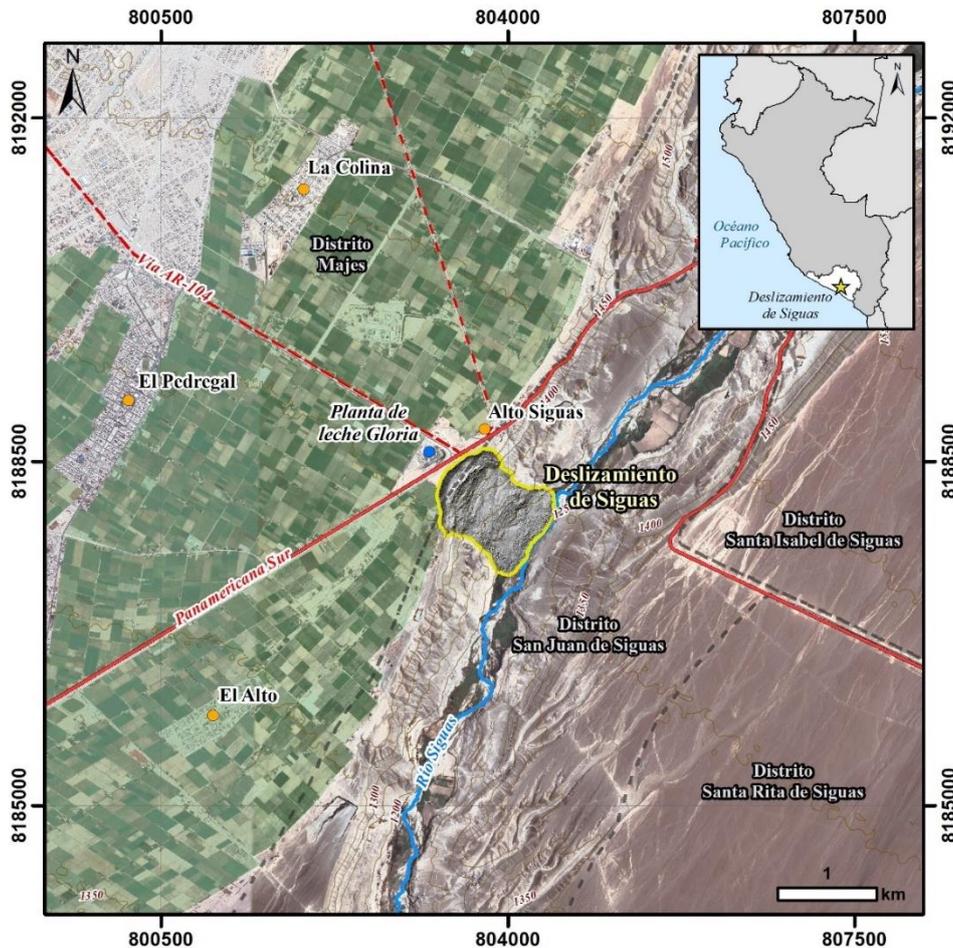


Figura 1. Mapa de ubicación del deslizamiento de Siguas.

1.1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO E INGENIERO GEOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO Y PELIGROS GEOLÓGICOS

Para este informe, se realizó un resumen de los aspectos geológico-litológicos y geomorfológicos descritos en estudios de monitoreo anteriores y trabajos de geología regional.

1.1.3.1 Aspectos geológicos e ingeniero geológicos.

En relación al contexto sismo tectónico, la geometría de la margen continental condiciona la partición de esfuerzos y/o distribución de la deformación en el Antearco y la Cordillera Occidental, lo cual genera sistemas de fallas continentales de dirección NO-SE, con potencial sismogénico. Adicionalmente, debe mencionarse que en la vertiente del Pacífico de la Cordillera Occidental son conocidos eventos sísmicos de magnitud elevada (Mw8), asociados con el proceso de subducción desarrollado a lo largo de toda la margen pacífica (Benavente & Audin, 2008).

El valle de Sigüas se desarrolla a través de una planicie costera constituida por afloramientos del paleógeno, neógeno y depósitos cuaternarios, depositados entre la precordillera y la Cordillera de la Costa. Las rocas del Complejo Basal afloran en los flancos del valle del Majes, hacia su lado suroccidental, formando colinas y cerros bajos que se pierden gradualmente bajo los depósitos de cuenca (Guisado, 1968).

Considerando el contexto geológico regional, en la base de la secuencia se encuentra la Formación Moquegua Inferior. Está compuesta principalmente por areniscas arcóscas de grano medio, arcillas rojas y conglomerados que se encuentran en bancos de entre 50 y 150 metros de espesor. Las arcillas se intercalan con láminas de yeso (Guisado, 1968 en Araujo et al., 2016). La Formación Moquegua Superior se encuentra en discordancia angular sobre la Formación Moquegua Inferior y se compone principalmente de conos aluviales, sedimentos conglomerádicos con influencia volcánica y areniscas blanco-grisáceas de grano medio a fino, que a veces son conglomerádicas, con algunas capas de arcilla y conglomerado de piedras pequeñas (Guisado, 1968 en Araujo et al., 2016). La Formación Millo consiste, por lo general, de conglomerados moderadamente consolidados, compuestos, en proporción variable, de clastos gruesos más o menos redondeados de intrusivos, cuarcitas y volcánicos provenientes del grupo Tacaza; la matriz es arenosa tufácea de grano grueso, en la zona, yace en discordancia sobre las rocas de la formación Moquegua (Vargas, 1970). Sobre la formación Millo, en los flancos del valle del Sihuas, se encuentran restos de depósitos volcánicos consistentes de tufos blancos y rosados (Guisado, 1968), de espesor estimado de 10 m. El tufo blanco es muy poroso y deleznable, de grano muy fino y presenta una pequeña proporción de biotita en laminillas de 0.25 a 1 mm. J. Guizado (1968) dio el nombre de conglomerado aluvial pleistocénico a la prolongación de un conglomerado que se halla cubriendo áreas extensas constituyendo las pampas cortadas por valles profundos como el de Majes, Sigüas y Vitor. El conglomerado está formado principalmente por elementos de 20 cm. de diámetro (Vargas, 1970). Los depósitos coluviales se forman por desprendimientos de sedimentos en las laderas y fondo del valle. También se encuentran depósitos eólicos en forma de cadenas de dunas aisladas en quebradas secas que atraviesan las pampas de Sigüas, con más de 5 metros de longitud y 3 metros de altura en dirección suroeste-noreste (Guisado, 1968 en Araujo et al., 2016).

En relación a los aspectos geológicos e ingeniero geológicos generales, localmente en la zona deslizada (cuerpo) y laderas (escarpe principal), se observan mayoritariamente litologías de las formaciones Moquegua Superior y Millo constituidas

por conglomerados de tonalidades oscuras y areniscas beige-grisáceas, cubiertas por un nivel piroclástico de tonalidad blanquecina. El cuerpo muestra por sectores, grandes bloques con estratos conservados, bloques métricos conglomeráticos y tufaceos dispersos, además de clastos de cantos sueltos dispuestos en diferentes sectores acorde a la deformación. En general, los afloramientos rocosos predominantes en la zona, constituidos por los conglomerados Millo, tienen características geotécnicamente desfavorables para laderas, al presentarse superficialmente poco consolidados y deleznable al contacto. Las rocas del Moquegua Superior tienen mayor grado de compactación en comparación a Millo, sin embargo, como unidad litológica, tiene características permeables favorables para la pérdida de presión de poros.

1.1.3.2 Aspectos geomorfológicos.

La geoforma principal en la zona es el valle de Sigwas, que se originó como resultado de la exhumación ocurrida durante el Mio-Plioceno a través de procesos orogénicos. Este valle atraviesa las pampas de Majes y Sigwas (figura 02) con un declive empinado de 200 metros de altura. También se pueden ver conos de deyección a ambos lados del valle de Sigwas; estos conos son antiguos (Pleistoceno a Cuaternario) y han sido reactivados por la erosión en la ladera del corte del valle. El fondo del valle está formado por depósitos aluviales y fluviales provocados por la actividad del río Sigwas y se utiliza como terreno de cultivo, aunque es vulnerable al desplazamiento de masas que pueden causar cambios de curso y crear barras arenosas en la parte baja (Araujo et al., 2017).

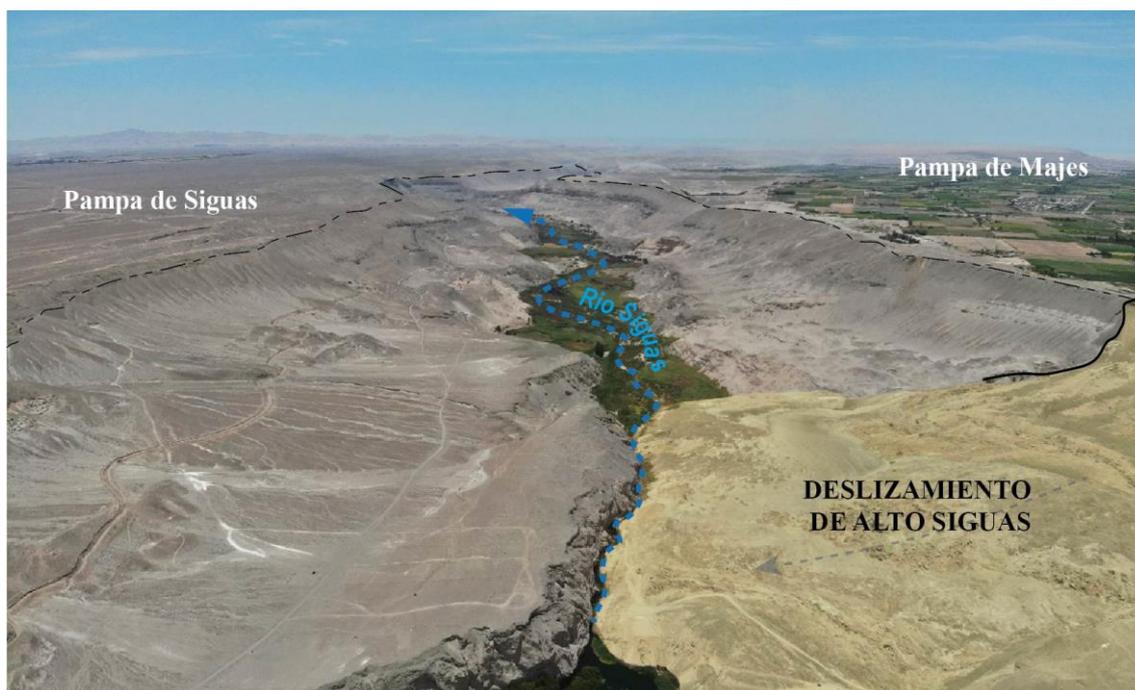


Figura 2. Vista aérea del valle de Sigwas, se observan las pampas disectadas por el valle. A la derecha, el deslizamiento estrechando el cauce frente a una gran terraza y conos de deyección antiguos.

El río Sigwas nace en las cercanías del nevado Ampato, en la parte alta de los Andes occidentales. Es alimentado por las aguas del río Colca a través de un sistema de canales y túneles de derivación, que permiten trasvase y transporte entre cuencas. Sus aguas son utilizadas para el riego de las pampas de Majes. Tiene una dirección relativamente al norte y a lo largo de su trayecto, su cauce puede ser alterado por

movimientos en masas que provocan cambios de curso y generan barras arenosas en las extensiones de la parte baja (Araujo et al., 2017).

1.1.3.3 Peligros geológicos por movimientos en masa.

El deslizamiento de Sigwas o “El Alto”, es actualmente el único que representa un peligro activo próximo a infraestructura crítica y los terrenos que lo circundan. Sin embargo, en las laderas del valle de Sigwas se han identificado otros deslizamientos antiguos, reactivados y activos, que varían en tamaño desde pequeños hasta extremadamente grandes, como es el caso del deslizamiento de Santa Isabel de Sigwas, que tiene una corona que se extiende a lo largo de 10 kilómetros, al sur de Sondor, en la margen izquierda del valle. Además, están otros deslizamientos notables como Tambillo, La Chimba, Candia, Tinajeras San Juan de Sigwas I y II. También se observan otros movimientos en masa, como, avalanchas, derrumbes, movimientos complejos (Pachaqui), flujos de detritos o huaycos sobre quebradas secas y zonas de cárcavas (Araujo et al., 2017).

Cabe mencionar que el principal factor que condiciona y detona los movimientos en masa activos en el valle de Sigwas, es la infiltración proveniente de las actividades de regadío, que actúa incrementando los volúmenes de agua en las “napas freáticas”. Estas variaciones de volumen se ponen en evidencia a través de las surgencias de agua que desfogan de los estratos permeables que afloran la margen derecha del valle. Los flujos de agua permanentes, generan pérdida de presión de poros que desestabilizan la ladera provocando los movimientos en masa descritos.

2 MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO DE SIGUAS

Para este reporte de monitoreo se realizaron mediciones geodésicas y sobrevuelos con dron, a fin de obtener insumos mediante el procesamiento fotogramétrico. Utilizando los datos procesados, se aplicaron técnicas geodésicas, fotointerpretación, teledetección, comparación de modelos digitales de elevación, nubes de puntos y perfiles topográficos. Los resultados de las técnicas aplicadas permitieron describir e interpretar la dinámica del deslizamiento de Alto Siguas durante el periodo comprendido entre noviembre de 2021 y noviembre de 2022.

2.1 Toma y procesamiento de datos

2.1.1 GEODESIA

El deslizamiento de Alto Siguas cuenta con una red de puntos de control (hitos de monitoreo) distribuidos en la masa deslizada y en los flancos (figuras 3 y 4). La medición de estos puntos se realizó con receptores GNSS diferenciales de doble frecuencia (Trimble R-12) aplicando la técnica de posicionamiento RTK (cinemático en tiempo real), durante cinco campañas de monitoreo entre el 24 de noviembre del 2021 y el 15 de noviembre del 2022 (~1 año). Las coordenadas medidas de cada punto de control no requirieron de postproceso y presentaron precisiones con errores menores al decímetro. Cabe mencionar que la posición del centro de los puntos de control terrestre (marcas de pintura y lonas cuadradas impresas) para vuelos con dron también se midieron con receptores GNSS en modo cinemático en tiempo real.

2.1.2.1 Cuantificación de desplazamientos y cinemática

Los desplazamientos horizontales (E, N) y verticales (Z), se cuantificaron a partir de la diferencia entre las coordenadas de noviembre del 2021 y las que se midieron en el 2022.

La cuantificación de los desplazamientos totales se presenta en la tabla 1; así mismo, se realizaron mapas de vectores de desplazamiento horizontal y vertical (figuras 3 y 4) para representar de manera gráfica, las magnitudes y las direcciones de los desplazamientos individuales de la red de puntos de control. Entre noviembre de 2021 y noviembre de 2022 todos los puntos de control instalados en el cuerpo del deslizamiento evidenciaron desplazamientos.

En relación a la tabla 1, cabe precisar que los puntos de control SI16 y SI19 ya no forman parte de la red debido a que fueron sepultados por la actividad del deslizamiento. Los puntos SI01 al SI26 se instalaron en el cuerpo y los puntos del SI27 al SI33 en los flancos. Los valores mínimos, máximos y promedios que aparecen al final de la tabla, no están tomando en cuenta los puntos que tienen un asterisco al lado, al presentar desplazamientos poco significativos, por lo tanto, no se consideraron para el cálculo de mínimos, máximos y valores promedio por no presentar desplazamiento significativo.

Tabla 1. Desplazamientos y velocidades de la red de puntos de control GNSS del deslizamiento de Alto Siguas. DH = Desplazamiento Horizontal, DV = Desplazamiento vertical, VH = Velocidad de desplazamiento horizontal.

Puntos de Control GNSS	24/11/2021 al 15/11/2022 (~1 año)		
	DH $\Delta E-N$ (m)	DV ΔV (m)	VH m/mes
SI01	4.86	-0.36	0.41
SI02	5.03	-0.33	0.43
SI03	5.34	-0.19	0.45
SI04	5.59	-0.27	0.48
SI05	5.82	-0.33	0.50
SI06	5.97	-0.33	0.51
SI07	6.07	-0.18	0.52
SI08	6.25	-0.13	0.53
SI09	6.38	-0.16	0.54
SI10	6.46	-0.14	0.55
SI11	6.74	-0.24	0.58
SI12	6.74	-0.41	0.58
SI13	7.21	-0.41	0.62
SI14	7.72	-0.91	0.66
SI15	4.95	-1.92	0.42
SI17	6.27	-1.22	0.54
SI18	8.00	-0.01*	0.69
SI20	9.70	-0.82	0.83
SI21	9.33	-0.53	0.80
SI22	7.57	-0.88	0.65
SI23	7.12	-0.91	0.61
SI24	6.34	-0.67	0.54
SI25	3.71	-1.14	0.32
SI26	5.76	-0.38	0.49
SI27*	0.01	-0.01	0.00
SI28*	0.05	-0.04	0.01
SI29	1.14	-0.80	0.10
SI30*	0.01	0.02	0.01
SI31*	0.00	0.01	0.00
SI32*	0.03	0.03	0.00
SI33*	0.00	0.02	0.00
Mínimo	1.14	-0.01	0.10
Máximo	9.70	-1.92	0.83
Promedio	6.24	-0.55	0.53

En el mapa de vectores de desplazamiento horizontal (figura 3) se observa que la dirección de los movimientos fue en su mayoría hacia el sureste en dirección al río Siguas. Por otro lado, el mapa de vectores de desplazamiento vertical (figura 4) muestra valores mayores hacia la zona de acumulación.

Los desplazamientos horizontales variaron entre 3.71 m (SI25) y 9.70 m (SI20) y los desplazamientos verticales entre -0.13 m (SI08) y -1.92 m (SI15). De los puntos de control instalados en los flancos solo el punto SI29 presentó desplazamiento horizontal y vertical significativo, de 1.14 m y -0.80 m respectivamente. En general, la red registro

un desplazamiento horizontal máximo de 9.7 m y desplazamiento vertical máximo de -1.92 m (tabla 1).

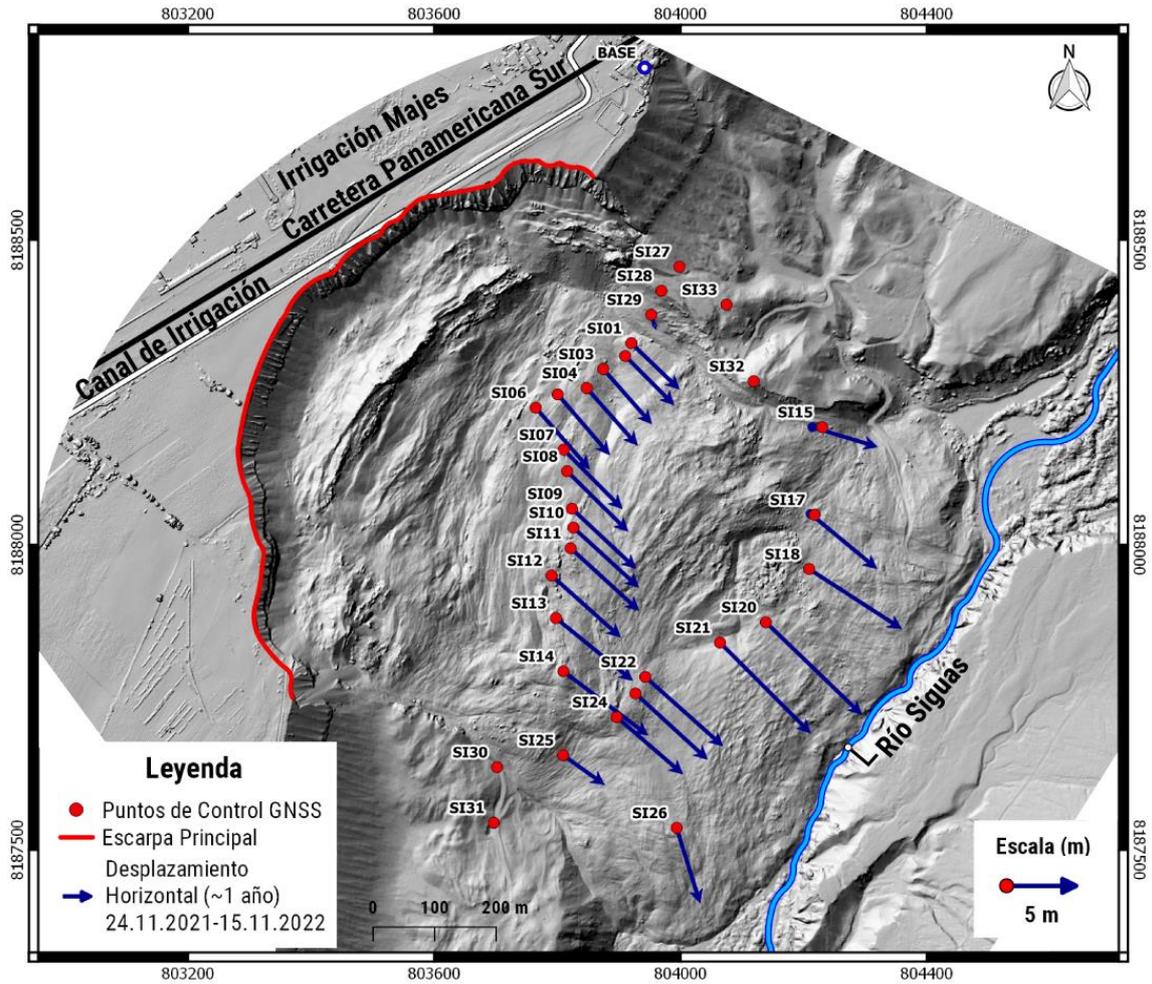


Figura 3. Mapa de vectores de desplazamiento horizontal de los puntos de control GNSS, para el periodo 11.2021-11.2022. La magnitud de los desplazamientos horizontales se puede apreciar en la tabla 1.

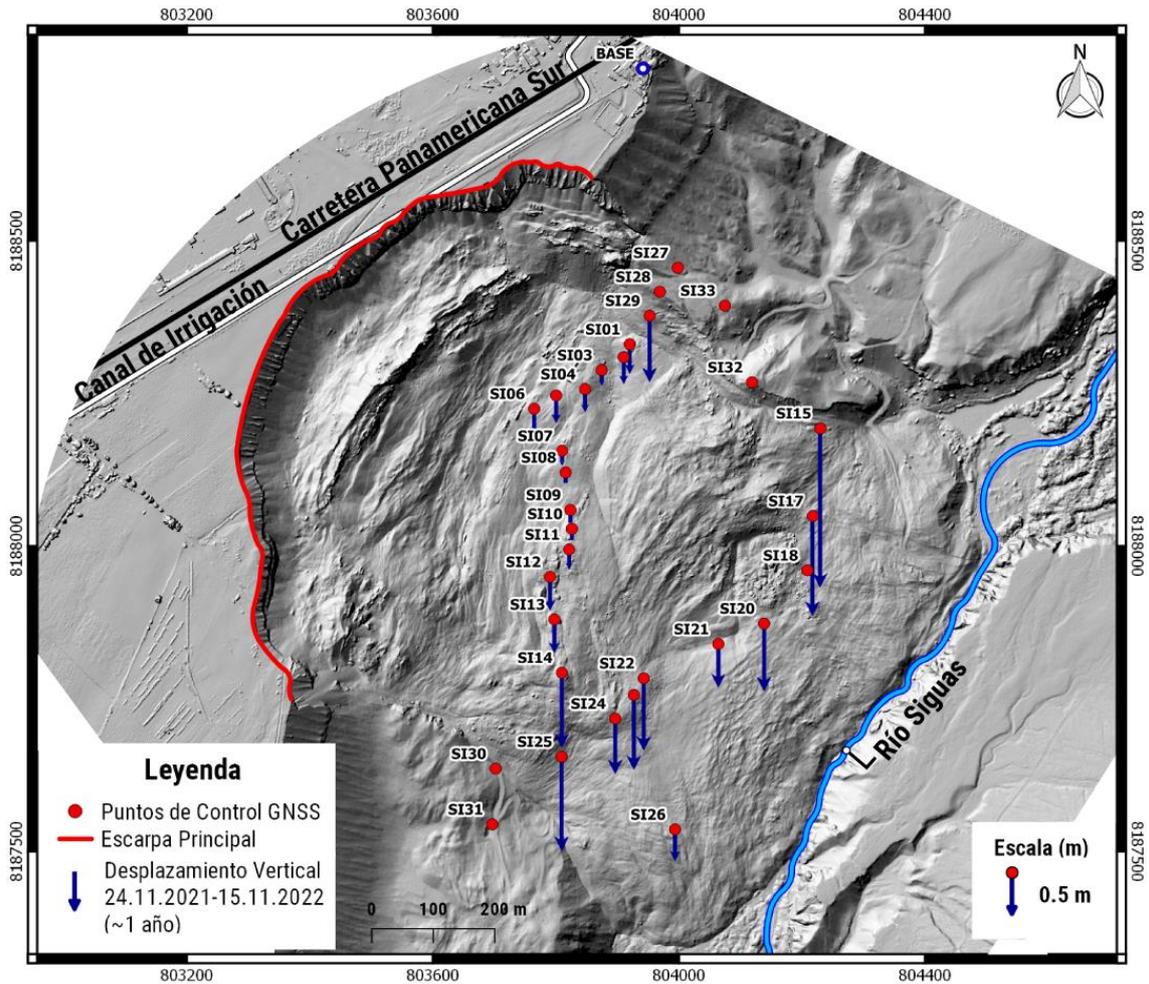


Figura 4. Mapa de vectores de desplazamiento vertical de los puntos de control GNSS, para el periodo 11.2021-11.2022. La magnitud de los desplazamientos verticales se puede apreciar en la tabla 1.

En relación a la cinemática, el mapa de vectores de desplazamiento horizontal (figura 4) muestra la representación gráfica de la magnitud y dirección de los desplazamientos horizontales de la red de control GNSS, medidos para el periodo nov 2021 – nov 2022. El desplazamiento general del deslizamiento ocurre de noroeste a sureste, con una velocidad promedio anual de 0.53 m/mes, considerando los puntos de control que presentaron actividad.

2.1.2.2 Series temporales

Con los datos de desplazamientos acumulados se graficaron las series temporales de la figura 5. La serie temporal de cada punto de control está representada por una línea de diferente color.

En general, las series temporales mostraron cambios en la velocidad de la red de puntos de control en los dos últimos periodos bajo análisis. Se aprecia desaceleraciones representadas por los cambios de pendiente en la figura 5, a excepción de los puntos SI27, SI28, SI30, SI31, SI32 y SI33 los cuales se encuentran fuera del cuerpo. Si se analiza el comportamiento de la serie temporal del punto de control más activo, SI20, se observa que presenta un movimiento horizontal hacia el sureste y un movimiento vertical negativo (hundimiento), los cuales son similares durante el primer y segundo periodo y que tienden a disminuir en los dos periodos

posteriores (figura 5). El patrón de movimiento que mostró el punto SI20, se observó prácticamente en todos los puntos de control.

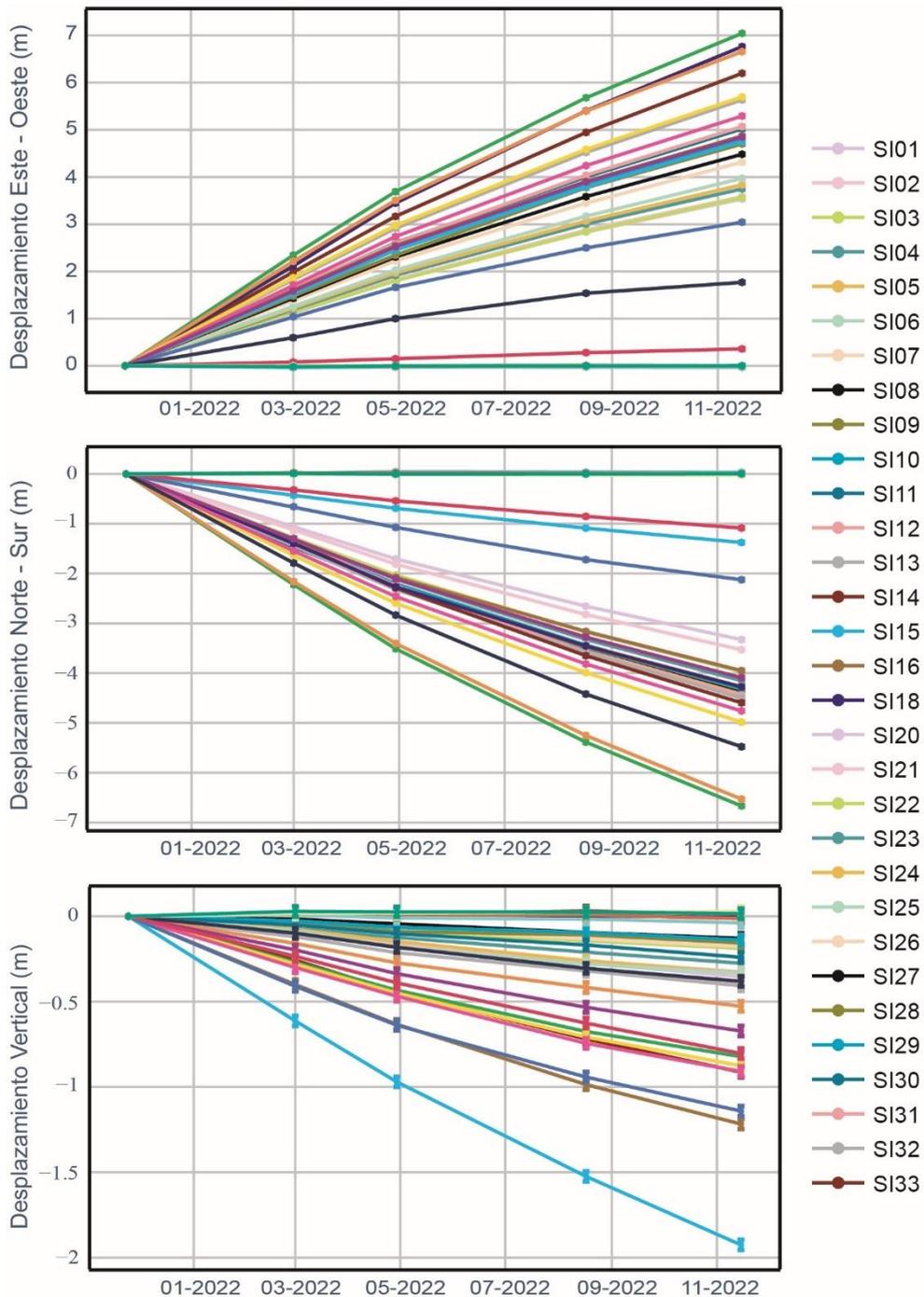


Figura 5. Series temporales de desplazamiento acumulado de las componentes norte-sur, este-oeste y vertical de los puntos de control instalados en el área de estudio. Las series temporales se graficaron a partir de la data obtenida en las cinco campañas de medición, entre noviembre de 2021 y noviembre de 2022.

2.1.2 INSUMOS FOTOGRAMÉTRICOS

Los sobrevuelos con dron para la obtención de insumos de alta resolución (ortomosaicos y modelos digitales de elevación) mediante fotogrametría, se realizaron en febrero, abril, agosto y noviembre del 2022. Las fotografías se capturaron con un dron multirrotor (Matrice 300 RTK).

Las fotografías aéreas capturadas con el dron se procesaron con la metodología SfM-MVS en el software Agisoft Metashape Professional 1.7.4. Luego de obtener la nube de puntos densa 3D, escalada y georreferenciada, se crearon y exportaron los DEMs y los ortomosaicos. Estos productos fotogramétricos se encuentran georreferenciados en el sistema de coordenadas UTM (zona 18S), Datum WGS 1984 y en el modelo geoidal EGM08.

2.1.3 FOTOINTERPRETACION

Para la fotointerpretación se utilizaron los ortomosaicos resultantes del procesamiento fotogramétrico. Las fechas de las ortofotos comparadas varían en un año, del 24 de noviembre del 2021 al 16 de noviembre del 2022.

Las ortofotos se utilizaron para graficar la variación de la corona (retrocesión) y pie (progresión) del deslizamiento de Siguas.

2.1.3.1 Comparación multitemporal (corona)

En general, se aprecia que la corona tuvo un retroceso casi homogéneo pero poco significativo durante el 2022 (figura 6), sin embargo, se observan sectores con retrocesión resaltante (figura 6 A, B y C). Los mayores retrocesos se concentraron hacia el extremo norte del deslizamiento.

En el detalle A de la figura 6, se observa un retroceso máximo aproximado de hasta 6 m hacia terrenos de cultivo. En relación a la longitud, el avance en este sector se observa casi continuo de lado a lado.

En el detalle B de la figura 6, se observa un retroceso máximo aproximado de hasta 4 m, hacia el norte, en dirección al canal inhabilitado que aún no fue afectado. En relación a la longitud, el avance en este sector se observa discontinuo por tramos. También se observa retroceso en el sector que sobrepaso el canal inhabilitado.

En el detalle C de la figura 6, se observa un retroceso máximo aproximado de hasta 8 m, en dirección noreste, hacia los terrenos aledaños a la localidad de Alto Siguas. En relación con la longitud, el avance en este sector se observa casi continuo de lado a lado.

Se aprecia un ligero avance hacia sectores con grietas cartografiadas el 2021. En el detalle B de la figura 6, se diferencia un avance posterior al segmento caído del canal inhabilitado, dentro del radio de una de las zonas de grietas.

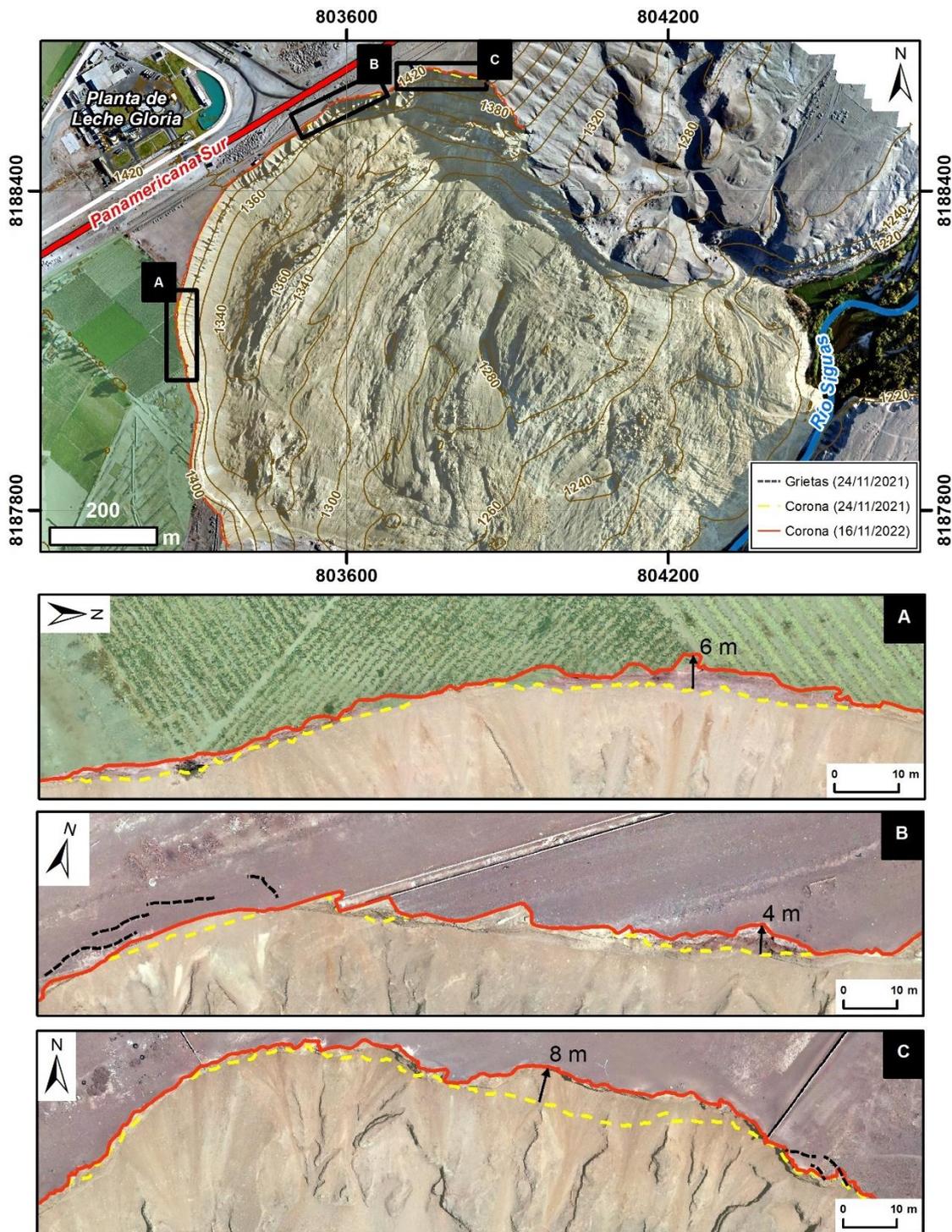


Figura 6. Mapa de comparación multitemporal del avance retrogresivo de la corona del deslizamiento de Sigüas, en las fechas del 24 de noviembre de 2021 y 16 de noviembre de 2022. Los detalles A, B y C muestran la retrogresión máxima aproximada en cada sector.

De la comparación de coronas 2021 - 2022, en área, se calcula un avance retrogresivo general aproximado de 1388 m². El retroceso máximo aproximado fue de 8 metros hacia los terrenos aledaños a la localidad de Alto Sigüas.

2.1.3.2 Comparación multitemporal (pie)

En general, se aprecia que el pie tuvo un avance homogéneo casi en toda su extensión durante el 2022 (figura 7), así mismo, se observan sectores con variaciones destacables (figura 7 A, B, C y D).

En el detalle A, se diferencia un avance progresivo casi homogéneo de la masa del deslizamiento; sin embargo, al extremo izquierdo se aprecia un pequeño sector erosionado donde el pie 2022 (línea roja) está tras la línea de noviembre del 2021 (amarilla).

En el detalle B, se observa principalmente un avance progresivo en la parte central, no obstante, se diferencian momentos progresivos y erosivos en ambos lados de la imagen. Hacia el lado derecho se ven la línea amarilla (noviembre 2021) y turquesa (abril 2022), por delante de noviembre del 2022 (línea roja), lo cual indica un intervalo de erosión y un ligero avance entre noviembre 2021 y abril 2022 y erosión entre abril y noviembre del 2022. Hacia el lado izquierdo se aprecia erosión entre noviembre del 2021 y abril del 2022, seguida de avance, entre abril y noviembre del 2022.

Continuando con el detalle C, de izquierda a derecha, se observa progresión continua de noviembre 2021 a noviembre 2022, luego se aprecia un pequeño tramo con erosión entre noviembre 2021 y abril del 2022 y posterior avance a noviembre del 2022. Ligeramente hacia la derecha, se observa un buen tramo con erosión entre noviembre 2021 y abril 2022 y posterior avance a noviembre del 2022.

En el detalle D, el avance progresivo es casi homogéneo en toda la figura, entre noviembre 2021 y noviembre 2022, salvo en un pequeño sector con erosión hacia el lado izquierdo, donde el pie de abril 2022 (línea turquesa) está tras la línea amarilla entrecortada que delimita el pie 2021.

Se puede estimar un avance máximo aproximado de 11 m del frente del deslizamiento hacia el río Sigwas (figura 7 C), entre noviembre del 2021 y noviembre del 2022.

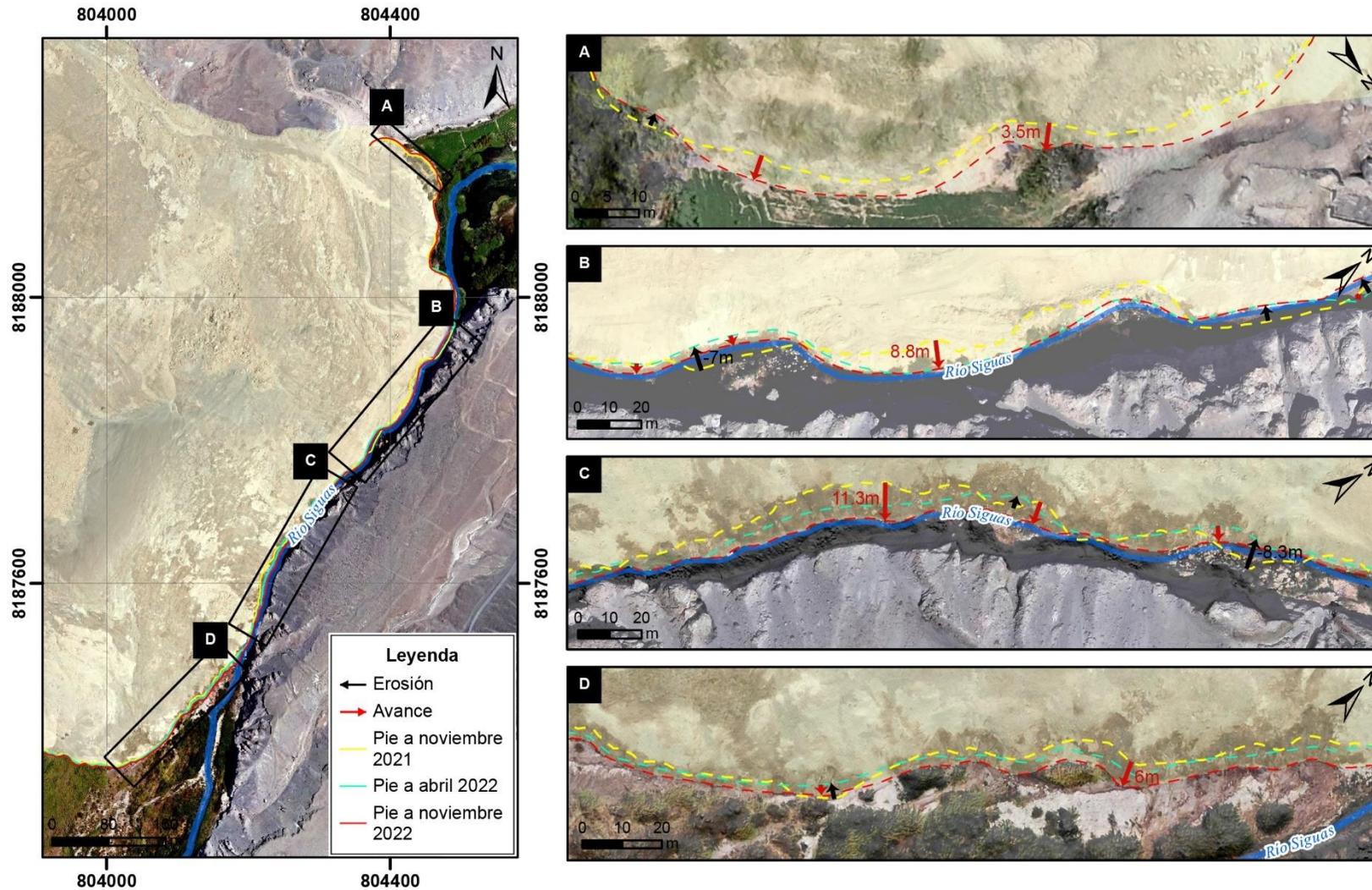


Figura 7. Mapa de comparación multitemporal del pie del deslizamiento de Sigwas, en las fechas del 24 de noviembre de 2021, 29 de abril y 16 de noviembre de 2022. Los detalles A, B, C y D muestran la variación del avance y erosión máxima aproximada en cada sector.

2.1.3.3 Medición de distancias mínimas a infraestructura critica

Se midieron las distancias mínimas hacia infraestructuras críticas (figura 8), a partir de puntos previamente escogidos para informes anteriores o a tramos de la corona cercanos afectados por el avance retrogresivo del deslizamiento. De las mediciones se tiene que la corona del deslizamiento de Alto Sigüas, a noviembre del 2022, se encuentra a aproximadamente 37 m de la carretera Panamericana Sur, 141 m de infraestructura del centro poblado de Alto Sigüas y 103 m de la planta de Leche Gloria. Cabe mencionar que la medición hacia el centro poblado de Alto Sigüas se realizó considerando un punto tomado en informes anteriores con mapas a otra escala y otras condiciones del lugar, sin embargo, la distancia puede variar acorde a la expansión de la infraestructura urbana.

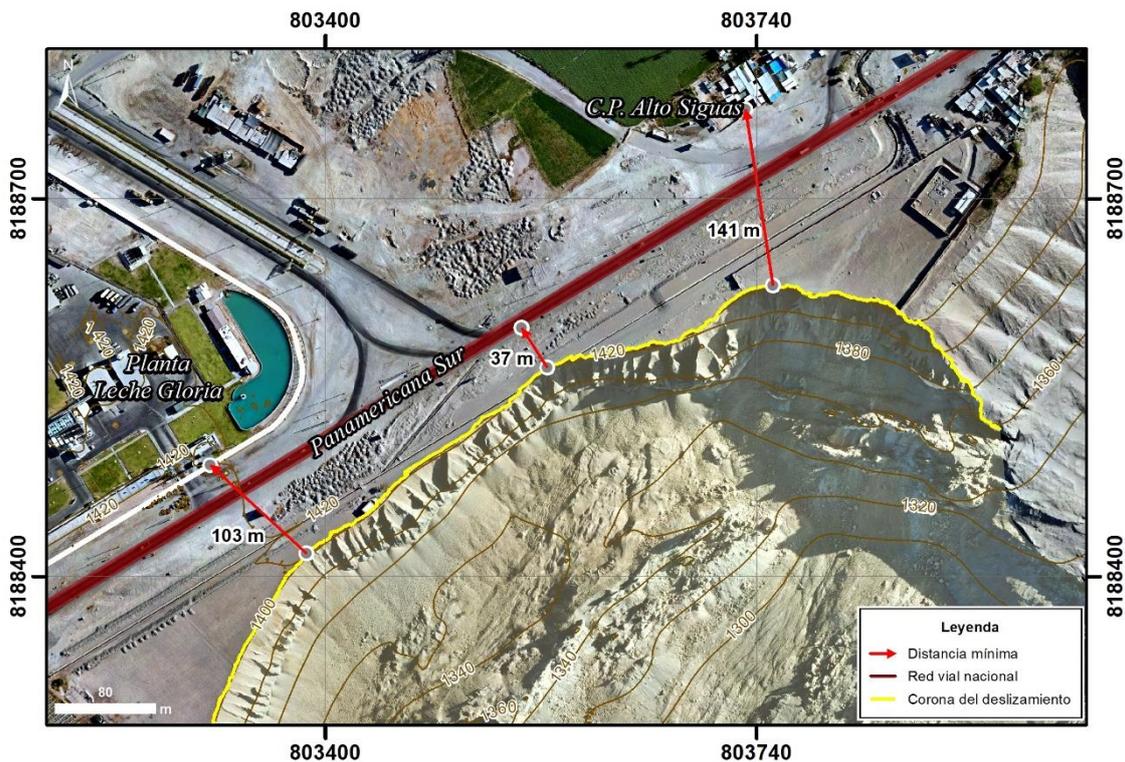


Figura 8. Medición de distancias mínimas realizadas sobre ortomosaico de noviembre de 2022, entre el límite de la parte superior del deslizamiento (corona) e infraestructura crítica (Carretera Panamericana Sur, Planta de leche Gloria y centro poblado de Alto Sigüas).

2.1.4 COMPARACIÓN DE DEMs

Se realizaron comparaciones para ver cambios en el relieve empleando modelos digitales del terreno (DEMs) de alta resolución obtenidos con fotogrametría, escogidos para intervalos de tiempo que permitan identificar cambios significativos.

El mapa (figura 9) fue elaborado a partir de la diferencia de 2 DEMs obtenidos con fotogrametría, el primero del 24 de noviembre de 2021 (6 cm/px) y el segundo del 16 de noviembre de 2022 (10 cm/px). Se utilizó la herramienta de Raster Calculator del software ArcGis para el procesamiento. La imagen muestra la diferencia entre alturas de cada píxel, las cuales oscilan principalmente en un rango de -6 a 6 m. Para una mejor visualización, se estableció una gama de colores que ayude a diferenciar fácilmente las zonas con cambios significativos, tanto para valores positivos como negativos; estos, se agrupan principalmente en tres tonalidades.

Los colores rojizos-anaranjados se encuentran en su mayoría concentrados cerca de la corona del deslizamiento, muestran zonas de disminución de elevación respecto al DEM del 2022 con el DEM del 2021. Progresivamente hacia la zona media y pie del deslizamiento, se aprecian tonalidades verdosas, que muestran aumento en la altura del terreno, respecto al DEM del 2021 con el DEM del 2022. Por último, el color blanco o zonas con tonalidades blanquecinas nos muestran sectores donde la variación no ha sido muy significativa con variaciones de -1 a 1 m.

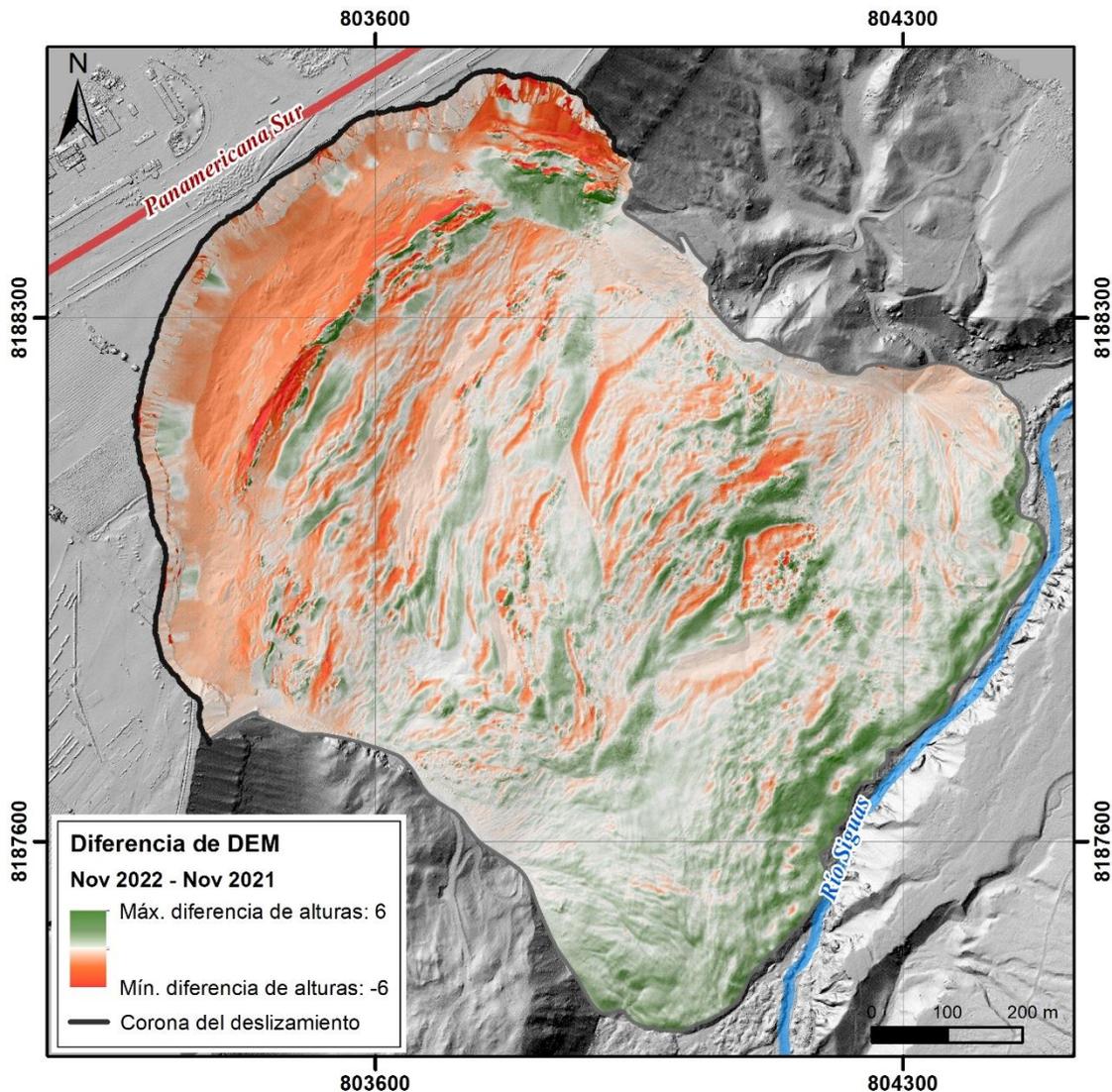


Figura 9. Diferencia de elevaciones, entre noviembre del 2021 y noviembre del 2022. Las tonalidades verdosas muestran diferencias positivas y las rojas diferencias negativas.

2.1.5 COMPARACIÓN DE PERFILES TOPOGRÁFICOS

Los perfiles topográficos utilizados para esta comparación (figura 10), se extrajeron de dos modelos digitales de elevación de alta resolución (11 y 18 cm/px), obtenidos mediante fotogrametría con fotografías aéreas tomadas con dron (Matrice 300 RTK). Las fechas de los relieves comparados varían en un año, del 24 de noviembre del 2021 al 16 de noviembre del 2022.

Por sectores, los perfiles sobrepuestos muestran diferencias claras en ambos ejes, altura (y) y distancia relativa (x), correspondientes tanto al movimiento de la masa (progresión) como a la dinámica de la corona (retrogresión). Cabe mencionar que el

lugar del perfil se escogió con criterios de campo y datos preliminares de desplazamientos. Para una mejor descripción, se dividió la sección en 4 segmentos de longitudes similares, de corona (carretera panamericana - canal) a pie (rio Sigwas). Se consideró la diferencia del perfil más antiguo con el más reciente.

2.1.5.1 Segmento (S-1)

De izquierda a derecha, entre 155 y 250 ms, se observan diferencias verticales aproximadas de -2.5 m. A partir de la distancia 275, se aprecian diferencias tanto verticales (-2.5 m) como horizontales (de +3 a +4 m), hacia la derecha de la imagen.

2.1.5.2 Segmento (S-2)

De izquierda a derecha, las diferencias horizontales (de +3 a +4 m), continúan similares al segmento (S-1) disminuyendo progresivamente la vertical desde los -2 m, hasta aproximadamente los 500 m; a partir de ese sector, se observan diferencias horizontales de aproximadamente de +4 y +5 m.

2.1.5.3 Segmento (S-3)

De izquierda a derecha, desde el inicio del segmento, la diferencia horizontal aproximada es de +6 m la cual continúa desde el segmento (S-2) hasta los 800 m, donde inician diferencias tanto verticales (de -2 a -2.5 m) como horizontales (+4 a +6 m), hacia la derecha de la imagen. A partir de los 970 m, las diferencias vuelven a ser horizontales (+6 m).

2.1.5.4 Segmento (S-4)

De izquierda a derecha, desde el inicio del segmento, se ven principalmente diferencias horizontales de aproximadamente de +6 m a +7 m, hasta el pie (rio Sigwas). El final del segmento muestra un claro avance del pie en dirección al río Sigwas.

PERFILES TOPOGRÁFICOS DESLIZAMIENTO ALTO SIGUAS 2021-2022

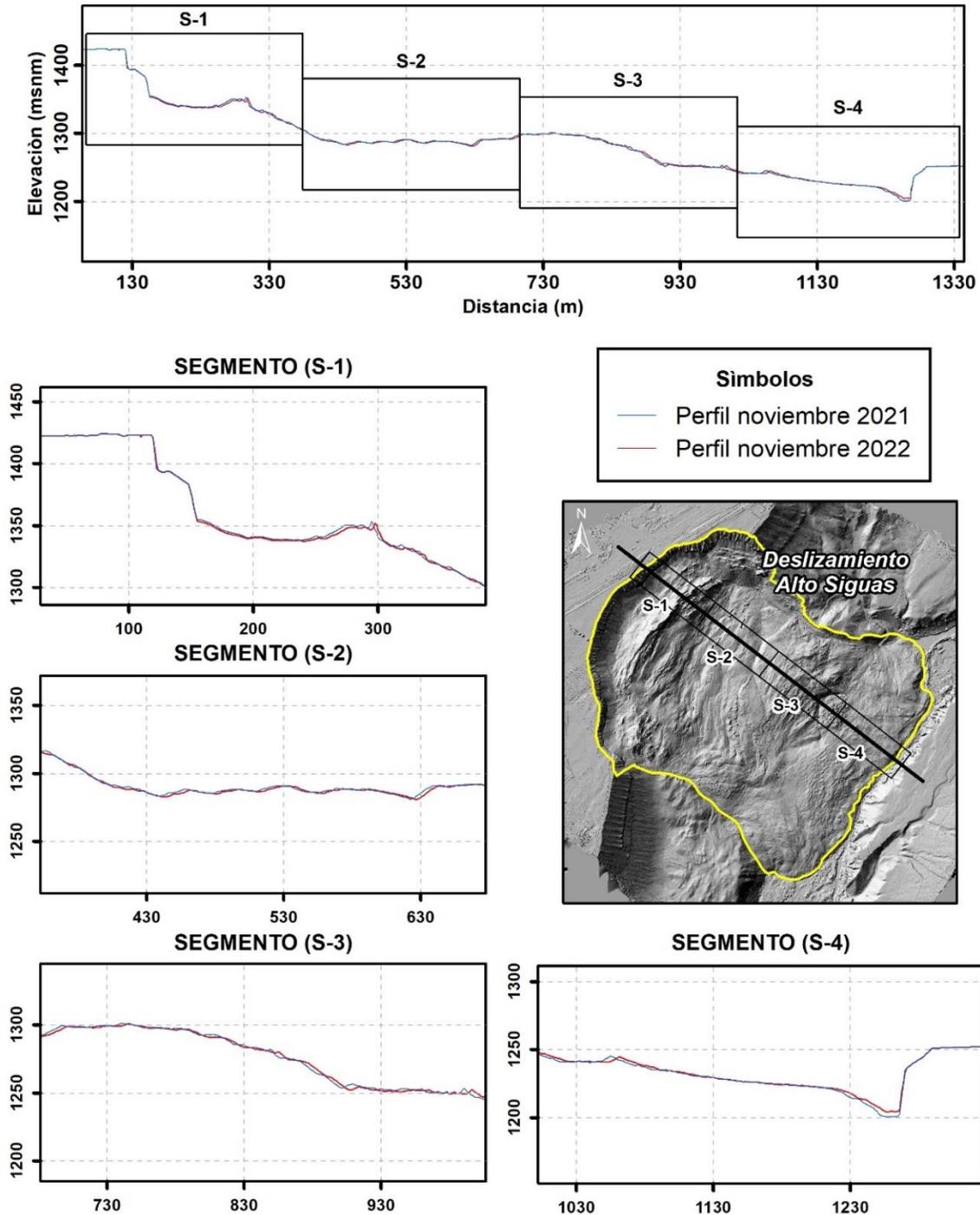


Figura 10. Perfiles topográficos multitemporales del deslizamiento de Alto Siguas realizados utilizando DEMs de alta resolución de noviembre del 2021 y noviembre del 2022. Para facilitar la descripción se dividió el perfil principal en 4 segmentos, de corona a pie.

2.2 Interpretaciones

2.2.1 DESPLAZAMIENTOS DEL CUERPO

La dinámica del cuerpo se interpretó mediante datos geodésicos, comparación de DEMs y perfiles topográficos.

Los datos instrumentales (geodésicos) muestran que el cuerpo presentó movimiento durante el último año, diferenciándose valores mayores de desplazamiento en la zona de intermedia hacia el pie. Se aprecian desplazamientos verticales más significativos en los lados de la zona media baja y desplazamientos horizontales mayores, en la parte central hacia el río Sigwas. Los valores mayores podrían estar relacionados a la separación de la masa en bloques, de forma progresiva, a manera de deslizamientos secundarios dentro de la masa, tanto desde la parte central, como en los lados, lo cual explicaría los desplazamientos verticales mayores. La concentración de valores horizontales mayores en la parte central hacia el pie, estaría relacionada al movimiento acumulado de la masa o al posible avance de un gran bloque. Las series temporales mostraron la permanente actividad de la masa deslizada. La desaceleración que se aprecia a partir del tercer periodo de medición podría estar relacionada a la disminución de asentamientos de los bloques en movimiento. Comparando los datos de velocidad, podría interpretarse el inicio de un periodo de desaceleración de la masa en relación a años anteriores, sin embargo, esta tendencia deberá corroborarse con datos futuros.

La diferencia de DEMs muestra principalmente zonas de transferencia de material, hundimientos y escarpes activos. También se observa la retrogresión de la corona y procesos de erosión locales en escarpes secundarios. Estos datos indican la permanente actividad en la masa deslizada y movimiento de material hacia el pie, este comportamiento podría interpretarse como avance general, la continua transferencia de la masa y hundimientos de bloques.

En general, los perfiles topográficos muestran variaciones verticales mayores hacia la parte central del cuerpo, que disminuyen conforme se van alejando del escarpe principal hacia la zona frontal, donde se distinguen principalmente diferencias horizontales. Se interpreta un movimiento general horizontal con mayor componente vertical en la parte alta del deslizamiento.

2.2.2 AVANCE DE LA CORONA

Utilizando fotointerpretación de ortomosaicos obtenidos con fotogrametría, se distingue que la corona tuvo un avance general casi homogéneo en toda su extensión durante el 2022, sin embargo, en análisis por sectores muestra tramos con avances en forma de picos y avances más extensos en longitud, estos últimos visibles en la zona de chacras y en mayor medida hacia el extremo norte. Estos sectores también se aprecian en las zonas de pérdida del escarpe principal, identificadas con diferencia de nubes de puntos.

Los avances sectorizados identificados durante el 2022 muestran retrogresión con ensanchamiento de la corona principalmente hacia el norte. Cabe mencionar que esta tendencia puede permanecer durante un tiempo indeterminado, acelerarse o desacelerarse, y que los avances retrogresivos futuros pueden presentarse en sectores no identificados que actualmente no tienen retrocesos significativos; en función a detonantes como sismos, excesos de riego u otros.

2.2.3 AVANCE DEL PIE

Los datos de vectores de desplazamiento horizontal y vertical muestran mayores movimientos de la zona central del cuerpo al pie, lo cual estaría mostrando un avance permanente de materiales acumulados, a partir de este sector.

La fotointerpretación muestra progresión homogénea en el frente del deslizamiento durante todo el 2022, con un alcance mayor hacia el río en relación a noviembre del 2021. Se observan algunos sectores con erosión, relacionados a la temporada de lluvias entre noviembre del 2021 a abril del 2022, sin embargo, se aprecia que, en gran parte del frente, el aumento del caudal no consiguió erosionar el pie significativamente.

Las comparaciones de nubes de puntos, modelos digitales de elevación y perfiles topográficos, muestran acumulación hacia todo el frente, con variaciones de alturas positivas. Estos datos se correlacionan con los datos geodésicos y de fotointerpretación corroborando la acumulación y avance del frente.

En general se aprecia progresión permanente del pie hacia el cauce del río Siguas entre noviembre 2021 y noviembre 2022, con un frente de acumulación no erosionado significativamente por el caudal de la temporada lluviosa 2021-2022.

3. CONCLUSIONES

1. Los datos de monitoreo geodésico obtenidos durante cuatro campañas de medición realizadas durante el 2022, muestran que el deslizamiento de Alto Sigwas presentó desplazamientos horizontales de entre 1.14 m y 9.70 m, desplazamientos verticales entre -0.01 m y -1.92 m, velocidad promedio anual de 0.53 m/mes desacelerando en comparación al periodo 2021 y dirección predominante de desplazamiento del cuerpo hacia el sureste en dirección al río Sigwas.
2. Los datos del relieve y fotointerpretación se correlacionan con los datos instrumentales geodésicos GNSS. En función a ello, se menciona que principalmente se presentaron hundimientos del cuerpo delante del escarpe principal y de escarpes menores, además de levantamientos y avances importantes en la zona media-baja del deslizamiento, hacia el río Sigwas.
3. Los datos de fotointerpretación obtenidos de la comparación de ortomosaicos multitemporales muestran que entre el 24 de noviembre del 2021 y 16 de noviembre del 2022, la corona tuvo un retroceso máximo de 8 m en su extremo norte. Así mismo, la corona se encuentra a aproximadamente 37 m de la carretera Panamericana Sur, 141 m de infraestructura del centro poblado de Alto Sigwas y 103 m de la planta de Leche Gloria. Se identificó mayor avance en el sector norte de la corona. En relación al pie, se aprecia progresión permanente hacia cauce del río Sigwas entre noviembre 2021 y noviembre 2022, con un avance mayor aproximado de 11 m.
4. Los resultados del monitoreo 2022 muestran que el deslizamiento de Alto Sigwas continua activo.
5. Debido a las condiciones geológicas, geomorfológicas y geodinámicas analizadas con datos de monitoreo, el deslizamiento de Alto Sigwas es considerado como zona de peligro Muy Alto a la ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros geológicos colaterales, que pueden ser “detonados” principalmente por la actividad antrópica (riego indiscriminado y sin tomar en cuenta los procesos descritos), sismos o condiciones climáticas excepcionales. Consecuentemente, persiste la posibilidad del avance progresivo de la masa deslizada hacia el río Sigwas (Valle de Sigwas) y retrogresivo hacia la carretera Panamericana Sur u otras direcciones en su ámbito.

4. RECOMENDACIONES

Considerando que la mayoría de condiciones de peligrosidad son las mismas a las del año 2021 y años anteriores, se actualizan las siguientes recomendaciones:

1. Debido a que un segmento de la escarpa principal ya sobrepasó al canal madre de irrigación y actualmente se encuentra a 37 metros de la carretera Panamericana Sur, se reitera la recomendación sobre el cierre definitivo del tramo amenazado y, por consiguiente, la utilización de la vía alterna. Esta medida, evitaría las vibraciones generadas por el alto tránsito de vehículos de carga pesada, las cuales, al encontrarse cada vez más cerca de la corona, podrían acelerar los procesos retrogresivos.
2. Restringir el acceso de personas a zonas inestables delimitando una franja de seguridad con señalización clara que rodee todo el deslizamiento.
3. Considerar la reubicación de la población que habita en cercanías de la corona del deslizamiento, ya que la zona representa peligro para la seguridad de los pobladores.
4. Continuar con las prácticas de riego tecnificado. Debe evitarse dejar discurrir el agua por más horas de las que se necesite para el tipo de cultivo sembrado. El correcto uso del riego debe ser planificado por especialistas en el tema y supervisado por las entidades competentes. Así mismo, deben restringirse cultivos tras la corona del deslizamiento para evitar posibles acumulaciones de agua generadas por fugas o excesos de riego.
5. Continuar con el monitoreo periódico del deslizamiento de Alto Siguas.

En función a datos del monitoreo obtenidos durante el 2022 y a estudios anteriores, se plantean las siguientes recomendaciones:

6. Informar sobre nuevas surgencias de agua o humedecimientos en el escarpe principal del deslizamiento, áreas circundantes o laderas cercanas, así como sobre nuevos agrietamientos que puedan aparecer tras la corona del deslizamiento de Alto Siguas.
7. Estar alerta ante posibles embalses en el río Siguas desencadenados por la aceleración del avance del deslizamiento producto de sismos de gran magnitud o factores antrópicos.



ING. LUIS ALBÍNEZ BACA



ING. JERSY MARIÑO SALAZAR
Director (e)
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico
INGEMMET

5. BIBLIOGRAFÍA

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2022). Monitoreo del deslizamiento de Alto Sigwas periodo 2021, distritos de Majes y San Juan de Sigwas, provincias de Caylloma y Arequipa, departamento de Arequipa. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7224, 37 p.

Araujo, G., Valderrama P., Taipe, E., Huarez, C., Díaz, J., Miranda, R. (2016), Dinámica del deslizamiento de Sigwas, distrito Majes y San Juan de Sigwas, provincias Caylloma y Arequipa, Informe Técnico N° A6715, INGEMMET, 44p.

Araujo, G. (2017), Área de Influencia del Deslizamiento de Sigwas y Geodinámica del Valle, distrito Majes y San Juan de Sigwas, provincia Caylloma y Arequipa, Región Arequipa, Informe Técnico N° A6772, INGEMMET, 16p.

Araujo, G., Valderrama, P., Taipe, E., Miranda R., (2017), Dinámica y Monitoreo del Deslizamiento de Sigwas, Informe Técnico N° A6748, INGEMMET, 54p.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2020). Monitoreo del deslizamiento Alto Sigwas, periodo 2018 – 2019. Región Arequipa, provincias Caylloma, Arequipa, distritos Majes, San Juan de Sigwas. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7032, 15 p.

Lacroix, P., Dehecq, A., & Taipe, E. (2020). Irrigation-triggered landslides in a Peruvian desert caused by modern intensive farming. *Nature Geoscience*, 13(1), 56-60.

Martínez, I. (2016). Los deslizamientos en el Valle de Sigwas y el exceso de riego en la Pampa de Majes (Arequipa). *Agua y más. Revista de la Autoridad Nacional del Agua*.

Delacourt, C., Allemand, P., Casson, B., & Vadon, H. (2004). Velocity field of the clapipe landslide measured by the correlation of aerial and QuisckBird satellite. *Geophysical Reserach Letters*, 15.

Handwerger, A., Roering, J. J., & Schmidt, D. A. (2013). Controls o the seasonal deformation of slow-moving landslide. *Earth and Planetary Science Letters*, 239-247.

Lacroix, P., Handwerger, A., & Bièvre, G. (2020). Life and death of slow-moving landslides. *Nature reviews earth & environment*, 404-419.

Leprince, S., Barbot, S., Ayoub, F., & Avouac, J. (2007). Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1529-1558.