



Universidad
Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

“Monitorización remota de deslizamientos activos en el Valle del Gállego”

“Remote monitoring of active landslides in the Gállego Valley”

Titulación: Grado en Ciencias ambientales

Autor: Marcos Domeque Clavería

Director: Jesús Guerrero Iturbe

Escuela Politécnica Superior de Huesca

2024-2025



Escuela Politécnica
Superior - Huesca
Universidad Zaragoza

El Trabajo de Fin de Grado que presento para su exposición y defensa es original y todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.

Resumen

Este trabajo Fin de Grado presenta un análisis detallado sobre la monitorización remota de seis deslizamientos activos situados en el Valle del Gállego, en la provincia de Huesca, específicamente en los municipios de Sallent de Gállego y Panticosa. Mediante el uso de tecnologías de teledetección tales como LIDAR e InSAR, se ha llevado a cabo un estudio de la evolución temporal de los movimientos del terreno durante el período comprendido entre 2010 y 2023. A través de la utilización de modelos digitales de elevación y datos satelitales de alta resolución, se lograron identificar patrones de desplazamiento y se llevó a cabo una evaluación de la precisión de ambas técnicas. Los resultados indican que el InSAR es más efectivo para identificar desplazamientos milimétricos en sectores donde la tasa de movimiento es lenta o está localizada, mientras que el LIDAR demostró ser útil en el análisis morfológico a escalas más amplias. Este estudio permite avanzar en la caracterización de riesgos geológicos, destacando la importancia de la teledetección en la prevención y gestión de los riesgos naturales.

Palabras clave

Teledetección, LIDAR, InSAR, Valle del Gállego, deslizamiento, monitorización y riesgo.

Abstract

This thesis presents a detailed analysis of the remote monitoring of five active landslides located in the Gállego Valley, in the province of Huesca, specifically in the municipalities of Sallent de Gállego and Panticosa. Using remote sensing technologies such as LIDAR and InSAR, a study of the temporal evolution of ground motions was carried out during the period between 2010 and 2023. Through the use of digital elevation models and high-resolution satellite data, displacement patterns were identified, and the accuracy of both techniques was assessed. The results indicate that InSAR is more effective in identifying millimeter-scale displacements in sectors where movement rate is slow or localized, while LIDAR proved useful in morphological analysis at larger scales. This study allows progress in the characterization of geological risks, highlighting the importance of remote sensing in the prevention and management of natural hazards.

Keywords

Remote sensing, LIDAR, InSAR, Gállego Valley, landslides, monitoring, and risk.

Índice

1. Introducción.....	4
1.1 Sistema de datos LIDAR.....	5
1.2 Sistema de datos InSAR.....	6
1.3 Software libre QGis.....	7
2. Objetivos.....	8
3. Área de estudio.....	9
3.1 Localización.....	9
3.2 Rasgos geológicos del terreno.....	13
3.3 Climatología del Valle de Tena.....	17
4. Metodología.....	17
4.1 Estudio con datos LIDAR y elaboración de mapas.....	17
4.2 Estudio con datos InSAR y elaboración de mapas.....	19
5. Resultados y discusión.....	20
5.1 Deslizamientos de la estación de esquí del Portalet.....	20
5.1.1 Comparativa temporal con datos LIDAR.....	20
5.1.2 Análisis mediante datos InSAR.....	23
5.2 Deslizamiento de Formigal.....	26
5.2.1 Comparativa temporal con datos LIDAR.....	26
5.2.2 Análisis mediante datos InSAR.....	28
5.3 Deslizamiento del Embalse de Lanuza.....	30
5.3.1 Comparativa temporal con datos LIDAR.....	30
5.3.2 Análisis mediante datos InSAR.....	32
5.4 Deslizamiento del Embalse de Escarra.....	34
5.4.1 Comparativa temporal con datos LIDAR.....	34
5.4.2 Análisis mediante datos InSAR.....	36
5.5 Deslizamiento en urbanización Argualas (Panticosa).....	38
5.5.1 Comparativa temporal con datos LIDAR.....	38
5.5.2 Análisis mediante datos InSAR.....	40
6. Conclusiones.....	42
7. Bibliografía.....	43

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de adquisición de datos satelitales con geometría ascendente y descendente..	7
Figura 2: Mapa área de estudio indicando la posición de los deslizamientos estudiados.....	10
Figura 3: Fotografías aéreas del deslizamiento en la estación de esquí del Portalet.....	11
Figura 4: Fotografías aéreas del deslizamiento en la población de Formigal.....	11
Figura 5: Fotografías aéreas del deslizamiento en el embalse de Lanuza.....	12
Figura 6: Fotografías aéreas del deslizamiento en el embalse de Escarra.....	12
Figura 7: Fotografías aéreas del deslizamiento en la urbanización Argualas de Panticosa.....	13
Figura 8: Mapa litológico del área de estudio.....	15
Figura 9: Leyenda del mapa litológico del área de estudio.....	16
Figura 10: Comparativa temporal del deslizamiento en la estación de esquí del Portalet.....	22
Figura 11: Mapa deslizamiento de la estación de esquí del Portalet.....	25
Figura 12: Comparativa temporal del deslizamiento de Formigal.....	27
Figura 13: Mapa deslizamiento población de Formigal.....	29
Figura 14: Comparativa temporal del deslizamiento en Lanuza.....	31
Figura 15: Mapa deslizamiento en Lanuza.....	33
Figura 16: Comparativa temporal del deslizamiento en el embalse de Escarra.....	35
Figura 17: Mapa deslizamiento embalse de Escarra.....	37
Figura 18: Comparativa temporal del deslizamiento en la urbanización Argualas de Panticosa....	39
Figura 19: Mapa deslizamiento urbanización Argualas en Panticosa.....	41

1. Introducción

Los deslizamientos se definen como masas de roca, sedimento o suelo que se desplaza ladera abajo por efecto de la gravedad. Estos describen y clasifican según el material y el tipo de movimiento, lo cual se relaciona con el mecanismo de falla. Según el sistema de clasificación estándar internacional (Turner AK, 2012) de Cruden y Varnes, (Cruden DM, 1996) utilizan dos términos para clasificarlos: el primero para definir el material y el segundo para definir el estilo de movimiento. Uno de estos tipos de movimientos es conocido como earthflow o flujo de tierra. Los earthflows o deslizamientos de tierra son movimientos típicamente complejos-compuestos caracterizados por fallas translacionales o rotacionales en la parte superior con escarpes de cabeza bien definidos tipo anfiteatro que gradualmente dan lugar a flujos de tierra en forma de lengua en la parte media e inferior (Guerrero et al., 2012). Aunque una parte importante de los deslizamientos de tierra se formaron a finales de los tiempos del Pleistoceno en relación con el retroceso de los glaciares, muchos de ellos muestran evidencias de actividad actual favorecida por múltiples fenómenos naturales y factores antropogénicos (por ejemplo, erosión fluvial, excavación, sobrecarga, infiltración mejorada).

Los volúmenes de los flujos de tierra varían de manera similar en varios órdenes de magnitud, desde eventos muy pequeños (un solo bloque de roca o un volumen de tierra que se puede remover fácilmente) hasta miles, o incluso millones, de metros cúbicos. Normalmente, existe una relación entre la frecuencia de ocurrencia y el volumen de material: los deslizamientos pequeños son relativamente frecuentes, mientras que los deslizamientos extremadamente grandes son relativamente raros. Las relaciones frecuencia-volumen son específicas del sitio y también pueden ser específicas de diferentes tipos de deslizamientos en el mismo sitio (Schuster RL, 2007).

Las velocidades de los flujos de tierra pueden variar en más de diez órdenes de magnitud y, por lo tanto, se definen mediante una escala logarítmica internacional de velocidad con siete clases, que utilizan términos que van desde extremadamente lento (unos pocos mm/año) hasta extremadamente rápido (más de 5 m/s) (Hungr et al., 2013). Los límites entre las distintas clases reflejan importantes consideraciones sociales. Por ejemplo, las clases muy rápido y extremadamente rápido incluyen velocidades superiores a la velocidad a la que una persona puede correr y, por lo tanto, definen situaciones en las que se puede esperar un gran número de víctimas mortales (Turner AK, 2018). De igual manera, las clases muy lento y extremadamente lento representan movimientos que, en muchos lugares, permiten que muchos edificios permanezcan en uso, a veces durante cientos de años, con daños y costos de reparación mínimos.

En general, el impacto económico generado por los flujos de tierra en Aragón, y más concretamente en el valle de Tena en la pasada década superó los 6 millones de euros (Guerrero et al., 2018). Como consecuencia, es necesario conocer su velocidad de desplazamiento y poder evaluar la amenaza que representan sobre el medio ambiente y el ser humano. Aunque existe un estudio previo de monitoreo de deslizamientos muy lentos en el Valle de Tena hasta el 2010, (Herrera et al., 2013) es necesario conocer la velocidad a la

que se desplazan los deslizamientos en la actualidad para minimizar los daños y costes económicos sobre las infraestructuras de la zona.

Para poder estudiar los deslizamientos de tierra y su desplazamiento a lo largo del tiempo, se emplean diferentes herramientas de teledetección. A día de hoy destacamos cuatro métodos que son los más usados en teledetección: Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR), fotogrametría aérea (con drones o vuelos tripulados), Light Detection and Ranging (LIDAR) y Sistema Global de Navegación por Satélite /Sistema de Posicionamiento Global (GNSS/GPS continuo) con estaciones permanentes o móviles.

Nosotros nos vamos a centrar en dos de ellos para la realización de nuestro estudio, el LIDAR y el InSAR. La información recogida por estos sensores será tratada con un sistema de información geográfico de acceso abierto (QGIS, versión 3.34).

1.1 Sistema de datos LIDAR

El Light Detection and Ranging (LIDAR), es una técnica de teledetección activa que utiliza un sensor embarcado en diferentes tipos de plataformas que emite pulsos de luz ininterrumpidamente y capta sus retornos, también denominados ecos o rebotes. Midiendo el tiempo que tarda en regresar ese pulso de luz, se puede calcular la distancia recorrida y, de esa forma, obtener la información tridimensional de los elementos.

Una de sus principales características es que dependiendo de la frecuencia y la intensidad del pulso emitido, este puede pasar a través de la vegetación proporcionando información de la estructura arbórea (lo que se conoce habitualmente como capacidad de penetración). El pulso emitido, al llegar a la superficie, impacta una porción de terreno (huella). Todas las superficies reflectantes dentro de la huella del pulso generan una onda de retorno. El número de retornos dependerá del tipo de superficie.

Los puntos LIDAR se pueden clasificar en varias categorías que incluyen desde el suelo o terreno desnudo, a la parte superior de la vegetación y el agua. Las diversas clases se definen mediante códigos numéricos de enteros en el archivo LAS. Los códigos de clasificación los definió la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) para todos los formatos LAS. Para nuestro estudio sólo nos interesa la clase 2, que hace referencia al suelo.

Además, los sistemas LIDAR se trabajan en el mismo formato que es el formato LAS. Este es un formato de archivo público que permite el intercambio de ficheros que contienen información de una nube de puntos tridimensional y es un archivo binario que mantiene toda la información procedente del sistema LIDAR y conserva la misma según la propia naturaleza de los datos y del sistema de captura. Además permite el almacenamiento de información adicional junto con cada valor posicional x, y, z.

Es muy importante conocer las especificaciones técnicas del LIDAR, destacando que recoge 0,5 puntos/m² en los LIDAR de primera cobertura (2009-2015), entre 0,5-2 puntos/m² en datos LIDAR de segunda cobertura (2015-2021) y 5 puntos/m² en los LIDAR de tercera

cobertura (2022-2025). A su vez también hay que destacar el Root Mean Squared Error en Z (RMSE Z) que es una medida de error que indica la diferencia promedio entre los valores de elevación (altura, o coordenada Z) medidos por el sensor LIDAR y los valores de elevación reales del terreno, teniendo para cada cobertura errores de $\leq 40\text{cm}$, $\leq 20\text{cm}$ y $\leq 10\text{cm}$.

1.2 Sistema de datos InSAR

Las técnicas de interferometría radar de apertura sintética (InSAR) son capaces de proporcionar cambios de posición de los puntos sobre la superficie terrestre haciendo uso de imágenes radar adquiridas en épocas distintas sobre las zonas de interés.

Utiliza información proveniente de sensores Radar de Apertura Sintética (SAR) normalmente instalados en satélites o aviones. Las imágenes radar más empleadas en la investigación son las tomadas por el Satélite Sentinel 1 de la Agencia Espacial Europea, cuyos datos son accesibles gratuitamente a través de la plataforma Copernicus (<https://www.copernicus.eu/en/access-data/conventional-data-access-hubs>). En el caso de las imágenes radar Sentinel, los sensores activos emiten pulsos electromagnéticos en el espectro de las microondas en el rango de la frecuencia y longitud de onda S (frecuencia de 2-4 Ghz y longitud de onda de 7.5-15 cm), operan tanto de día como de noche y son capaces de ver el terreno a través de las nubes (Crosetto et al., 2021). Adquieren imágenes en órbitas ascendentes (cuando el satélite viaja de sur a norte) y descendentes (cuando el satélite viaja de norte a sur), también llamados “tracks”, con una frecuencia de adquisición de seis días en la mayoría de los casos, siendo de doce para algunos de ellos. Este escenario de observación junto con la política de datos abiertos y accesibles a las pocas horas de ser adquiridos, permite la generación de resultados de deformación con prácticamente las mismas frecuencias de adquisición del dato, haciendo posible el uso de la técnica InSAR como una herramienta de monitorización (Crosetto et al., 2021).

El sistema realiza horariamente consultas en busca de nuevas adquisiciones para cada track. En caso de existencia de imágenes se inicia un flujo de procesado automático, basado en herramientas de uso generalizado en la comunidad InSAR, para la generación de mapas de fase (interferogramas), coherencia y desplazamiento.

El sensor emite los pulsos en una geometría lateral (one-side-looking), en contraste con la visión cenital de los sensores ópticos en los satélites de observación de la tierra. Los desplazamientos vienen dados en la dirección de observación del satélite (“Line of Sight” o LOS), correspondiendo el signo positivo a desplazamientos hacia el satélite y el negativo a desplazamientos que se alejan de él. Para obtener los desplazamientos en el eje vertical y planimetría es necesario descomponer los movimientos en LOS teniendo en cuenta la geometría del sistema. Toda esta información técnica puede ser consultada en la memoria de elaboración de resultados del programa InSAR de la Agencia Espacial Europea (EGMS, 2017, 2020).

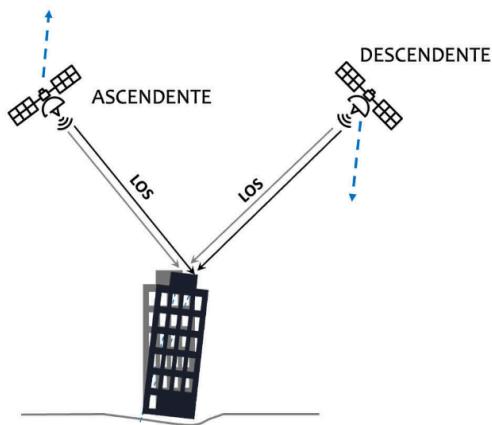


Figura 1. Esquema de adquisición de datos satelitales con geometría ascendente y descendente.

Fuente: IGN

1.3 Software libre QGis

Para realizar el estudio, vamos a emplear QGis. Es un sistema de información geográfica (SIG) de código abierto y gratuito que permite a los usuarios crear, editar, visualizar, analizar y publicar datos geoespaciales. Es un software profesional que es fácil de usar y es ampliamente utilizado para el procesamiento y análisis de datos geográficos, facilitando la toma de decisiones basadas en información territorial.

A lo largo del proyecto, vamos a emplear este programa para la elaboración de todos los mapas, trabajando en él con datos LIDAR y datos InSAR que obtenemos de diferentes fuentes, tanto en formato vectorial como raster, y así poder observar el desplazamiento de los seis deslizamientos estudiados a lo largo del tiempo.

Dentro de QGis vamos a trabajar en el sistema geodésico de referencia de coordenadas proyectadas, UTM ETRS89, utilizado como estándar en Europa para la georreferenciación en el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de alta precisión.

2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es monitorear seis deslizamientos activos que afectan a infraestructuras y generan un impacto significativo tanto económico como ambiental en el Valle del Gállego, dentro de los municipios de Panticosa y Sallent de Gállego.

Este estudio se plantea como una continuación de trabajos previos en la zona hasta 2010 (Herrera et al., 2013), empleando dos sistemas diferentes de teledetección con el fin de analizar el comportamiento que han mantenido estos deslizamientos hasta el 2023. Así se busca contribuir al conocimiento sobre su evolución temporal y la magnitud del desplazamiento acompañado con el riesgo que representan para las poblaciones, las infraestructuras y el medio ambiente.

Los objetivos específicos son:

1. Calcular la tasa de movimiento de los deslizamientos activos seleccionados en el Valle del Gállego entre los años 2010-2023, mediante un análisis comparativo de modelos digitales de elevación obtenidos por tecnología LIDAR y datos InSAR extraídos del European Ground Motion Service (EGMS).
2. Comparar las tasas de movimiento pasadas con las actuales, determinar su tendencia (incremento o decrecimiento) y, en función de ello, pronosticar un aumento o disminución de los daños en un futuro cercano.
3. Evaluar la efectividad comparativa de las tecnologías LIDAR e InSAR en la detección y caracterización de flujos de tierra, estableciendo cuál de los dos métodos ofrece una mayor precisión, resolución y utilidad práctica en el contexto del Valle del Gállego.

3. Área de estudio

3.1 Localización

El área de estudio se sitúa en la Comarca Alto Aragón que se localiza al norte de la provincia de Huesca, con una extensión de 1.389,7 Km² en Pre-pirineo y Pirineo (Figura 2). Tiene una población de 14.570 habitantes y la densidad de población es de 10,71 habitantes/Km². Además los núcleos habitados se encuentran entre los 600 y 1300 m de altitud.

La zona de estudio abarca el Valle de Tena que es el más conocido turísticamente y está formado por los municipios de Sallent de Gállego, Panticosa y Hoz de Jaca. Este estudio se localiza en los municipios de Panticosa y Sallent de Gállego que es el municipio más noroccidental limitado con Francia.

Especificamente, en el interior del Valle de Tena, hemos investigado 6 deslizamientos localizados en los municipios de Panticosa y Sallent de Gállego (Figura 2) y que ya habían sido previamente cartografiados por Guerrero et al. (2012).

Área de estudio

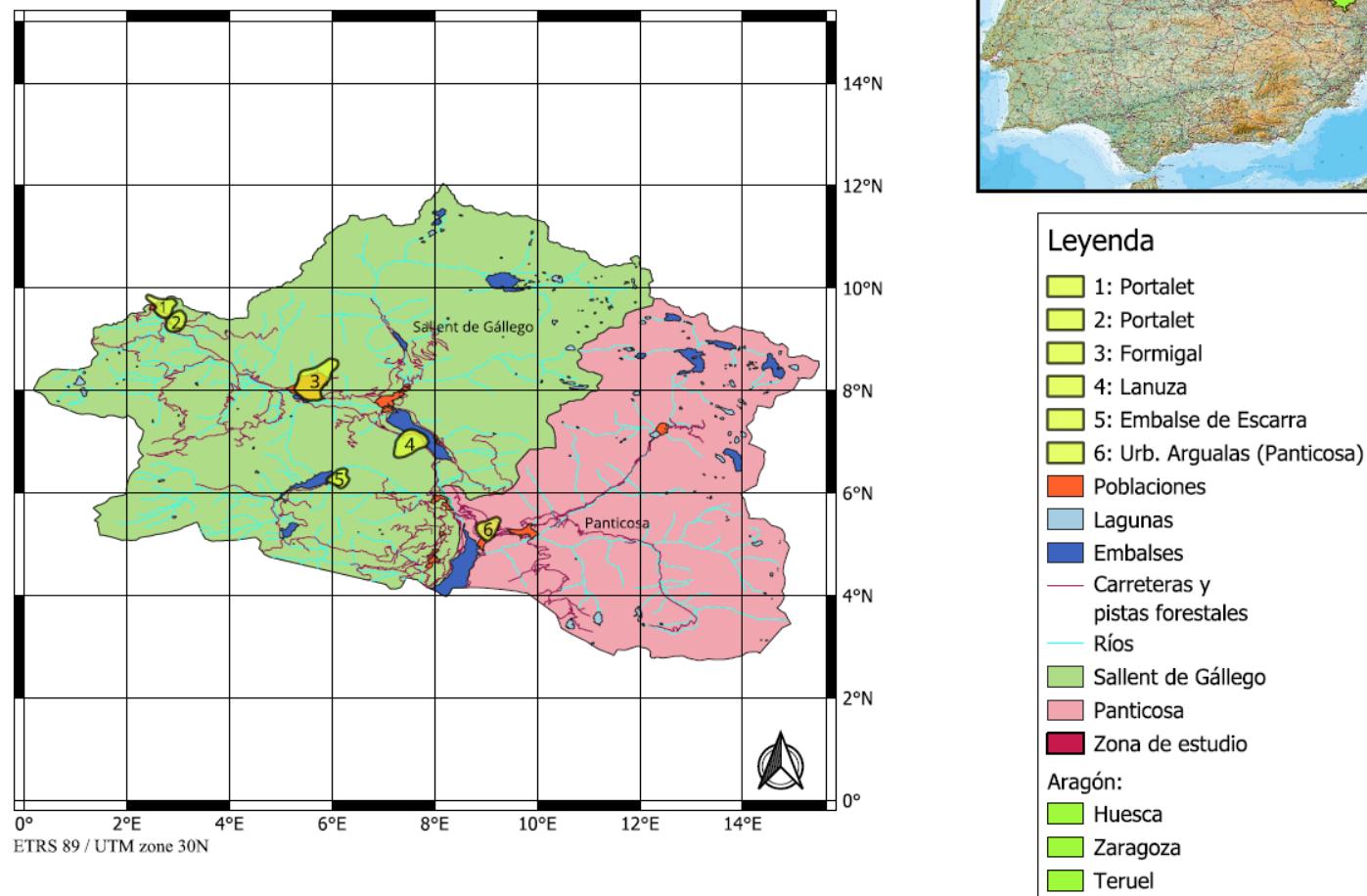


Figura 2: Mapa área de estudio indicando la posición de los deslizamientos estudiados. Fuente: Elaboración propia

Los dos primeros deslizamientos tienen efectos sobre la estación de esquí del Portalet (deslizamientos del Portalet), el tercero influye en la localidad de Formigal (deslizamiento de Formigal), el cuarto deslizamiento afecta al embalse de Lanuza (deslizamiento de Lanuza), el quinto amenaza el embalse de Escarra (deslizamiento del embalse de Escarra) y el último incide en la zona de apartamentos turísticos de Argualas en Panticosa (deslizamiento de Panticosa).

Los deslizamientos de la estación de esquí del Portalet, como observamos en la figura 7, están próximos entre sí, formando dos áreas deformadas de grandes dimensiones, la de la izquierda abarca 442.960 m^2 mientras que la de la derecha es un poco más pequeña, con un área de 368.576 m^2 . Este deslizamiento genera problemas en la estación de esquí del Portalet y la carretera A-136. Ambas infraestructuras muestran agrietamientos y cizallamientos severos que requieren un mantenimiento constante.



Figura 3: Fotografías aéreas del deslizamiento en la estación de esquí del Portalet.
Fuente: Google Earth Pro

El deslizamiento que encontramos en el núcleo de población de Formigal, como podemos observar en la figura 4, abarca un área de $1.175.575\text{ m}^2$. Este deslizamiento amenaza a toda la población de Formigal y su movimiento podría generar daños en las infraestructuras, en las pistas forestales y en el medio ambiente. Algunas de las casas situadas más al pie tienen pequeños agrietamientos en los vanos.



Figura 4: Fotografías aéreas del deslizamiento en la población de Formigal. Fuente: Google Earth Pro

El deslizamiento de Lanuza, como podemos observar en la figura 5, abarca un espacio de 760.211 m². Este deslizamiento amenaza el embalse de Lanuza pudiendo generar daños en la infraestructura del embalse y en la carretera A-136. En Octubre de 2024, la carretera tuvo que ser interrumpida por mostrar abombamientos y grietas. Las obras de reparación superaron el millón de euros.



Figura 5: Fotografías aéreas del deslizamiento en el embalse de Lanuza. Fuente: Google Earth Pro

El deslizamiento del embalse de Escarra, como podemos observar en la figura 3, tiene un área de 325.294 m². El embalse cuenta con una capacidad de 5 hm³ y su cerrada está formada por una presa de tierra con núcleo de arcilla que fue construida en el 1945 (Miteco, 2025; SNCZI-Inventario de Presas y Embalses). La presa ha sido reparada en varias ocasiones con la inyección de mortero para evitar las filtraciones (Guerrero et al., 2012). Su desplazamiento supone una amenaza hacia el embalse ya que su movimiento podría ocasionar la rotura parcial de la presa y generar un gran impacto económico aguas abajo de la misma.



Figura 6: Fotografías aéreas del deslizamiento en el embalse de Escarra. Fuente: Google Earth Pro

Finalmente, el deslizamiento de Panticosa, que afecta a la urbanización Argualas en la entrada a la población de Panticosa (Fig. 6), abarca un área de 423.821 m². Este deslizamiento además de ser una amenaza para los apartamentos turísticos, también es una amenaza para la carretera A-2606 y, las demás vías y pistas forestales. Las viviendas muestran claros signos de deformación como vanos de puertas y ventanas rotos y cizallados, ascensores inutilizados y agrietamientos. La carretera de acceso a la urbanización y la carretera A-2606 que conecta la A-136 con Panticosa se encuentran agrietadas y con ondulaciones patentes.



Figura 7: Fotografías aéreas del deslizamiento en la urbanización Argualas de Panticosa.

Fuente: Google Earth Pro

3.2 Rasgos geológicos del terreno

El territorio de Sallent está formado en gran parte por materiales paleozoicos pertenecientes a la zona pirenaica denominada «Alta Cadena Paleozoica», o «Zona Axial». Estos materiales son del Silúrico o más modernos; en ellos abundan las pizarras con algunos potentes tramos calcáreos. Están afectados por un intenso plegamiento hercínico acompañado por un metamorfismo de bajo grado (Ríos et al., 1989). Cabe señalar que, en la parte oeste afloran materiales del Estefaniense y Pérmico tardí-hercínicos acompañados de un vulcanismo andesítico. Los terrenos pertenecientes al ciclo alpino presentan una laguna estratigráfica desde el Triásico al Cretácico inferior inclusive. Se sitúan en la parte meridional y comprenden la serie calcárea de las sierras interiores pertenecientes a la Zona Surpirenaica (Figura 8).

Todos estos materiales, tanto hercínicos como su cobertura alpina, pertenecen al manto de Gavarnie, cuyo sustrato autóctono aflora al este en la ventana tectónica de Gavarnie.

Desde el punto de vista geográfico la superficie corresponde a la red hidrográfica del alto río Gállego. Al norte se extiende la vasta depresión del llamado Valle de Tena, de morfología en

general blanda por la abundancia de pizarras, hasta llegar a los macizos graníticos de la parte norte y en el interior de los macizos graníticos abundan los pequeños lagos (ibones) y de origen glaciar, la mayoría de ellos recrecido artificialmente mediante represas.

En cuanto a la geología que encontramos en los deslizamientos estudiados, podemos observar pizarras en todos ellos, el deslizamiento que afecta a la urbanización Argualas en Panticosa está completamente formado por estas pizarras negras a veces algo arenosas, según finas hiladitas de color más claro. En general, el control de la estratificación no es posible en las áreas que ocupan estas pizarras, áreas que por el contexto estructural sabemos que están intensamente deformadas (Wensink, 1962).

Los deslizamientos de los embalses de Lanuza y Escarra, además de la pizarra también encontramos caliza tableada negra, esta caliza de aspecto masivo y gris claro en el paisaje, contiene manchas dolomíticas amarillas o gris claro que le dan un aspecto tigreado en afloramiento (J. Valero, 1974).

En cuanto al deslizamiento de Formigal, además de la pizarra mencionada anteriormente, tiene una pequeña parte formada por morrenas, este material de origen glaciar se encuentra en cotas entre 1500 y 2300 metros pero en situaciones lo encontramos en cotas más bajas por procesos de solifluxión recientes (Bono, 1978).

En el deslizamiento del Portalet, encontramos pizarras en su mayoría y también una parte con grauvacas y pizarras grises con gruesas micas que se van alternando y pueden llegar a alcanzar varios metros (Wensink, 1962).

Litología de Sallent de Gállego y Panticosa

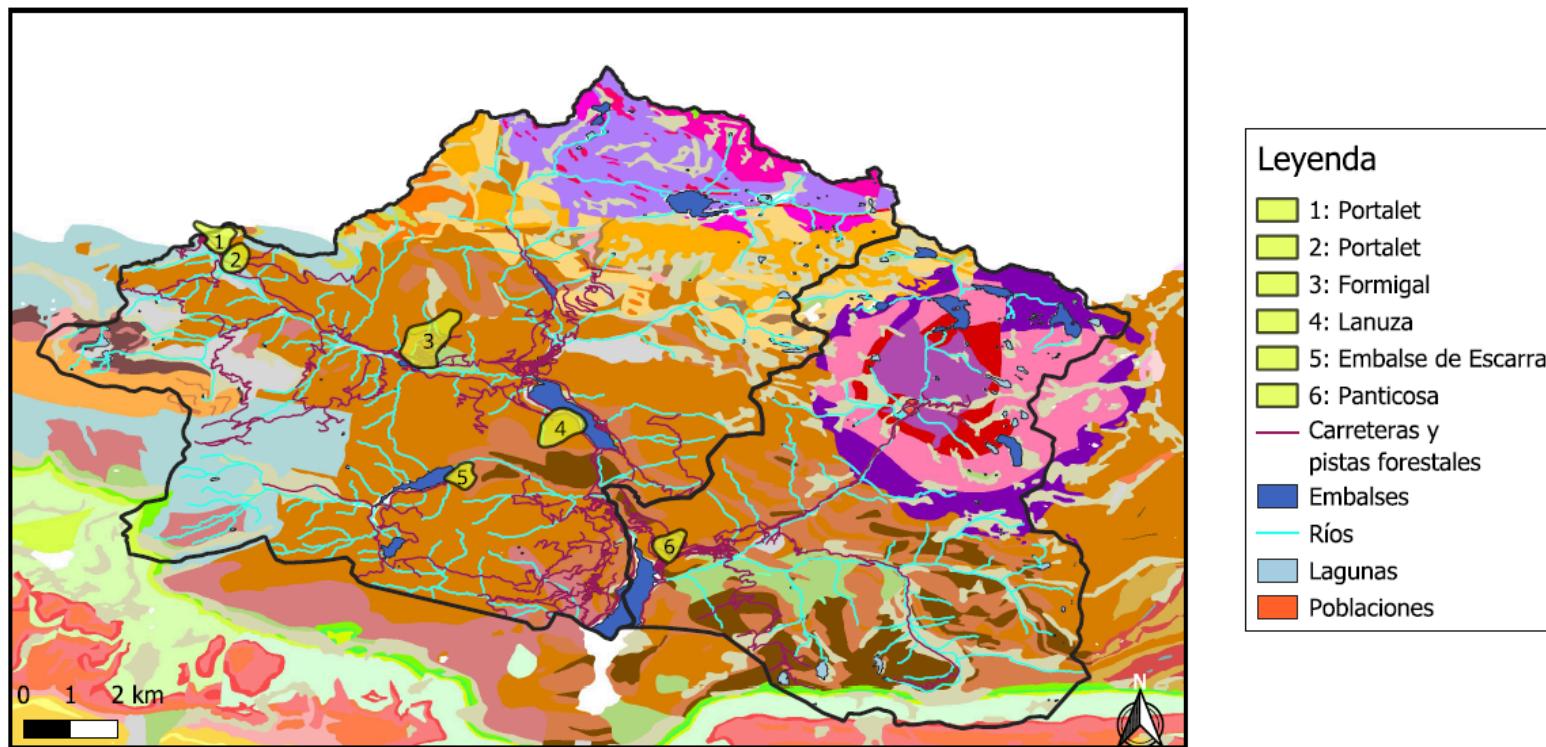


Figura 8: Mapa litológico del área de estudio. Fuente: Elaborado a partir del mapa geológico de la Hoja 145 de Sallent de Gállego (Ríos et al., 1989).

LEYENDA

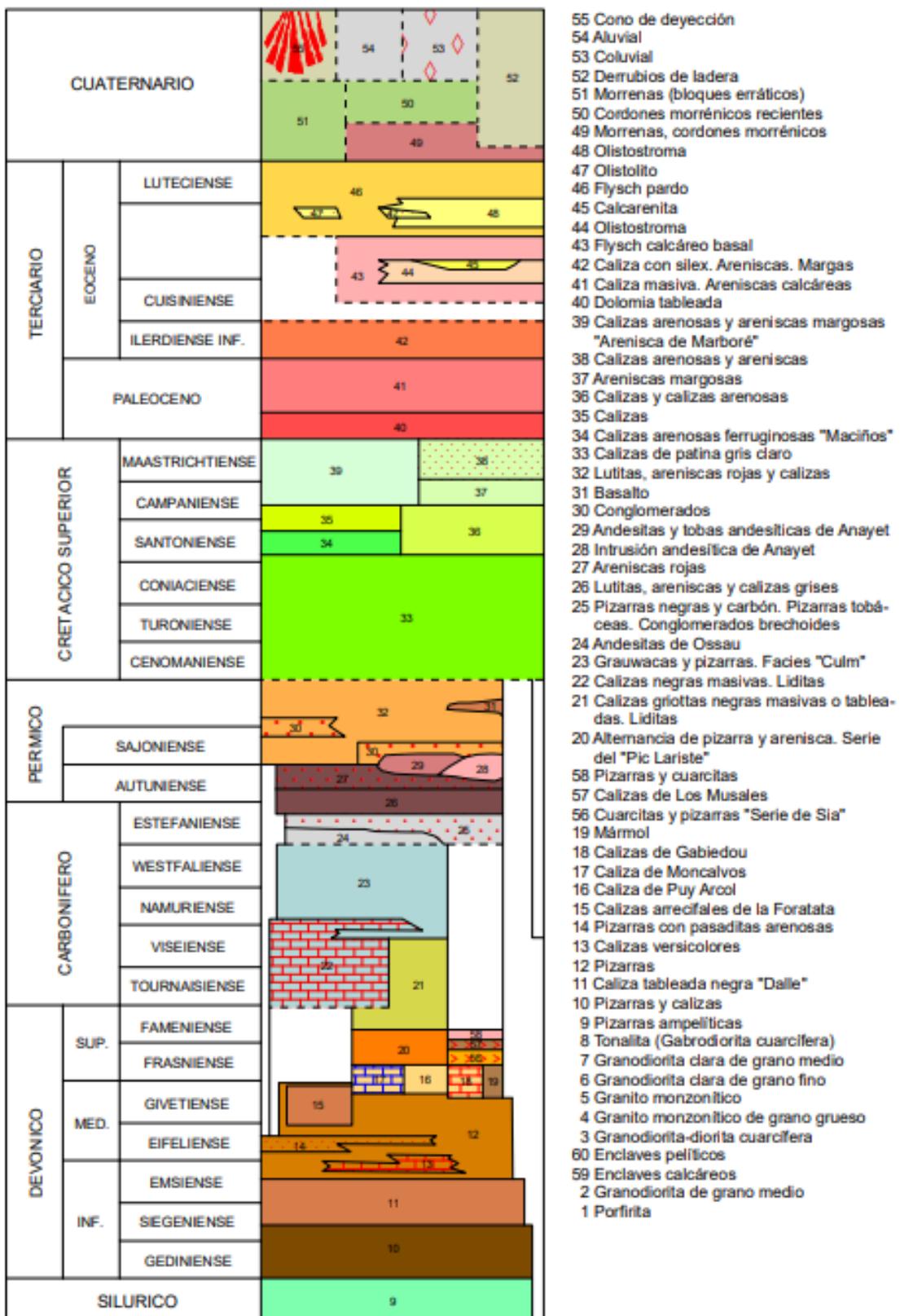


Figura 9: Leyenda del mapa litológico del área de estudio. Fuente: Ríos et al. (1989)

3.3 Climatología del Valle de Tena

El clima en el Valle de Tena presenta una temperatura media anual de unos 4-5 °C y una precipitación acumulada de unos 1400-1800 mm/año. Gran parte de las precipitaciones se presentan en forma de nieve que persiste muchas veces hasta entrado el verano en los montes más altos. Actualmente no existen verdaderos glaciares suspendidos (de tipo pirenaico) y solo pueden observarse pequeños acúmulos cerca de las mayores altitudes.

La nieve abriga en invierno y las plantas reviven cuando funde la capa nival, pueden observarse porciones muy pendientes con escasa capa nival que funde pronto al llegar la primavera. En parte se deben a la fuerte pendiente, pero muchas veces son debidas a la acción del viento que barre los crestones para aumentar la cantidad en determinados puntos del valle.

4. Metodología

En primer lugar, se han seleccionado seis deslizamientos activos de la provincia de Huesca, en los municipios de Sallent de Gállego y Panticosa (Figura 2). Estos fueron escogidos por la amenaza que pueden generar en el futuro ya que afectan a poblaciones, carreteras e infraestructuras. Los deslizamientos fueron estudiados utilizando datos LIDAR e InSAR. A continuación se detalla los procesos requeridos con cada una de éstas técnicas.

4.1 Estudio con datos LIDAR y elaboración de mapas

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de estos deslizamientos utilizando datos LIDAR. Para ello, comenzamos por buscar en Internet el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), donde se puede localizar en el mapa de España los deslizamientos. Usando la herramienta de “buscar por polígono”, procederemos a seleccionar cada deslizamiento y posteriormente a descargar los datos correspondientes a LIDAR 1^a Cobertura (2008-2015), con una resolución baja de medio punto por metro cuadrado, LIDAR 2^a Cobertura (2015-2021), con una resolución media de un punto por metro cuadrado, y LIDAR 3^a Cobertura (2022-2025), de alta resolución con cinco puntos por metro cuadrado. Concretamente, los vuelos LIDAR de nuestra zona de estudio tuvieron lugar en los años 2010 (1^a generación), 2020 (2^a generación) y 2023 (3^a generación) y fueron descargados en formato LAZ.

Para trabajar con las nubes de puntos LAZ, empleamos QGis y más concretamente la consola y las utilidades que ofrece el conjunto de herramientas LAStools. En primer lugar, utilizamos la herramienta “laszip” para descomprimir los datos LIDAR previamente

descargados del CNIG, a un formato LAS. Posteriormente, procedimos a emplear la herramienta “las2dem” con el fin de convertir estos datos en Modelos Digitales de Elevación (DEM) en formato Tiff a una resolución de 1 metro. Cada deslizamiento estaba cubierto por 2 a 4 DEMs.

Los DEM fueron fusionados para cada año de adquisición y deslizamiento, con el fin de crear un MDE unificado por cada año de adquisición que incluyera toda la superficie de cada deslizamiento. Para ello, empleamos la función “Miscelánea ráster - Combinar”. Tras obtener los MDE de 2010, 2020 y 2023 para cada deslizamiento, utilizamos la calculadora ráster para determinar la diferencia entre los MDE de 2020 y el de 2010, así como la diferencia entre los MDE de 2023 y el de 2020, permitiéndonos así cuantificar la magnitud del movimiento a lo largo de esos años.

Una vez que hubimos obtenido las capas con ambas diferencias, procedimos a ajustar las propiedades de las capas para facilitar la identificación de cualquier desplazamiento. Para ello, accedimos a las propiedades de la capa, seleccionamos simbología y aplicamos un renderizador de pseudocolor monobanda, estableciendo un valor mínimo de -2 y un máximo de 2. Posteriormente, creamos nueve clases de valores, cada una con un color distinto, lo que nos permitirá, a través de la coloración, identificar en las restas de MDE, qué zonas han experimentado desplazamiento y cuáles han permanecido estables. Además, asignamos valores con una diferencia de 0.5, considerando que el rango de -0.5 a 0.5 carece de color, dado que representa el error cuadrático de los datos LIDAR.

Cada uno de estos procedimientos y transformaciones en las características de los recientes MDE derivados de la diferencia de los MDE en diversos años se realizó para cada deslizamiento. Esto nos permitió verificar la velocidad de desplazamiento individual de cada deslizamiento y, posteriormente, crear un mapa para cada uno que muestre la comparación entre los años 2020 y 2010, así como entre 2023 y 2020.

Previo al inicio del diseño de los mapas, generamos para cada deslizamiento una capa de archivo shape con una forma poligonal que delimitó el contorno de cada deslizamiento, permitiendo así la visualización del área correspondiente a cada uno. Asimismo, obtuvimos del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) y de la Infraestructura de Conocimiento Espacial de Aragón (ICEARAGON) los datos relacionados con la hidrografía, los asentamientos poblacionales y la red de carreteras para facilitar la creación de los mapas.

Para terminar utilizamos la herramienta “nueva composición de impresión” en QGis para diseñar los mapas referentes a cada uno de los deslizamientos.

4.2 Estudio con datos InSAR y elaboración de mapas

A continuación comenzamos a trabajar con datos InSAR.

Los datos los obtenemos del proyecto European Ground Motion Service (EGMS) que nos proporciona a escala continental información homogénea de los movimientos del terreno con precisión milimétrica y actualizaciones anuales de manera gratuita (<https://egms.land.copernicus.eu/>).

Filtramos en función de los datos que nos interesa, que son los referentes al Calibrado (Nivel 2B) ascendente y descendente. Posteriormente marcamos con un polígono el primer deslizamiento y procedemos a descargar los datos de Calibrado (Nivel 2B) correspondiente al periodo de 2019 a 2023, lo que nos proporciona un archivo en formato Excel para su uso en QGis. Este archivo contiene los registros de movimiento del deslizamiento, con mediciones cada 5 a 7 días desde enero de 2019 hasta diciembre de 2023. Reiteramos este procedimiento con cada uno de los deslizamientos, logrando así compilar todos los datos tanto en sentido ascendente como descendente de los seis deslizamientos analizados.

A continuación comenzamos a trabajar con el QGis. El primer paso consiste en cargar los datos obtenidos del EGMS, los cuales están en formato Excel. Para ello, incorporamos una capa de texto delimitado que permitirá la conversión de esos datos de Excel en una nube de puntos. Especificamos las coordenadas requeridas: longitud, latitud y, en el campo Z, se incluye height_WGS84, dado que trabajaremos en el sistema de coordenadas WGS 84.

Una vez tenemos nuestra nube de puntos, ya sea ascendente o descendente, incorporamos el MDE del deslizamiento que estamos estudiando primero y aplicamos sobre el MDE la herramienta “Mapa de sombras (Hillshade)” para observar de fondo una representación sombreada del relieve del terreno, posteriormente añadimos las capas referentes a la hidrografía, los asentamientos poblacionales y la red de carreteras.

Finalmente añadimos el polígono del deslizamiento y utilizamos la herramienta “Superposición vectorial - Cortar”, permitiendo así cortar los datos de la nube de puntos sobre el polígono del deslizamiento. Esto nos permitirá visualizar únicamente los puntos relevantes que se relacionan con el movimiento identificado en nuestro deslizamiento.

Repetimos este proceso para cada uno de los deslizamientos, utilizando tanto los datos ascendentes como los descendentes, lo cual nos permitirá crear dos mapas para cada deslizamiento. Cada mapa incluirá los datos relacionados con el movimiento detectado por los satélites en cada deslizamiento.

Una vez tenemos todos completados, modificamos la simbología de los datos tanto ascendentes como descendentes para poder diferenciarlos, para ello diseñamos los ascendentes con forma circular y los descendentes en cuadrados. Posteriormente, asignamos diferentes colores a los valores de mean_velocity para identificar qué puntos

dentro de los deslizamientos han experimentado un mayor desplazamiento en comparación con otros. Introducimos siete categorías de colores que van desde el verde hasta el rojo para valores positivos y negativos. El verde indica el desplazamiento más pequeño, con valores entre 0 y 3 mm, mientras que el rojo señala el desplazamiento más considerable, con valores entre 20 y 30 mm. Todos estos colores reflejan el desplazamiento registrado en esos puntos entre los años 2019 y 2023. Repetimos todos estos procedimientos para los seis deslizamientos analizados y, una vez completados, procederemos a la creación de los mapas.

Para concluir, desarrollamos una nueva composición de impresión y comenzamos a elaborar los mapas con una única representación para cada deslizamiento, en la que podemos ver dos mapas: uno con los valores ascendentes y el otro con los valores descendentes, además le añadimos a cada uno la flecha del norte y la escala del mapa. Debajo de ellos colocamos la leyenda y una gráfica que representa el desplazamiento en mm en función de las fechas de medición y que nos permite observar la evolución de los datos ascendentes, descendentes y los valores máximos de estos datos.

5. Resultados y discusión

5.1 Deslizamientos de la estación de esquí del Portalet

Estos movimientos están formados por dos áreas de grandes dimensiones, la de la izquierda abarca 442.960 m² mientras que la de la derecha es un poco más pequeña, con un área de 368.576 m². Se tratan de dos paleodeslizamientos activos con un volumen total de 48 hm³ y planos de rotura en torno a los 20 m, que reactivados en el 2004 con la construcción de una zona de aparcamiento al pie del talud (Cobos et al., 2021). Según estos autores, la desestabilización del deslizamiento llevó al desplazamiento de la ladera a más de 35 cm/año con el consiguiente deterioro de la carretera A-136 y el parking. Las medidas de corrección supusieron un coste de más de 1,5 millones de euros (Guerrero et al., 2012).

5.1.1 Comparativa temporal con datos LIDAR

La figura 10 es una comparativa temporal del deslizamiento que amenaza la estación de esquí, utilizando las diferencias de los MDE, creados a partir de datos LIDAR que corresponden a los períodos 2020-2010 y 2023-2020.

En los dos mapas se ha utilizado un renderizado en pseudocolor con valores estandarizados que oscilan entre -2 y 2 metros, resaltando los movimientos del terreno. Los valores representados en azul indican un aumento en la elevación, mientras que los colores cálidos, en particular el rojo, reflejan una disminución en la elevación, relacionada con el

desplazamiento descendente característico de los deslizamientos. Teniendo en cuenta los errores que tienen los datos LIDAR para cada cobertura, podemos observar en el mapa izquierdo que hace referencia al periodo 2020-2010 una coloración cálida, en tonos naranjas y rojos. Estas coloraciones visible en todo el mapa son artefactos generados por los errores que introduce la nube de puntos del 2010.

El mapa que hace referencia al periodo 2023-2020, no hay coloraciones ni rojas ni azules en toda la masa deslizada lo que indica que el desplazamiento del deslizamiento ha sido inferior a 0,5 m en tres años (tasa de movimiento menor a 16.5 cm/año). Las manchas lineares situadas en la parte superior junto a la cicatriz del deslizamiento más septentrional son artefactos derivados del procesado de los datos LIDAR.

Comparativa Temporal del Deslizamiento en la Estación de Esquí del Portalet

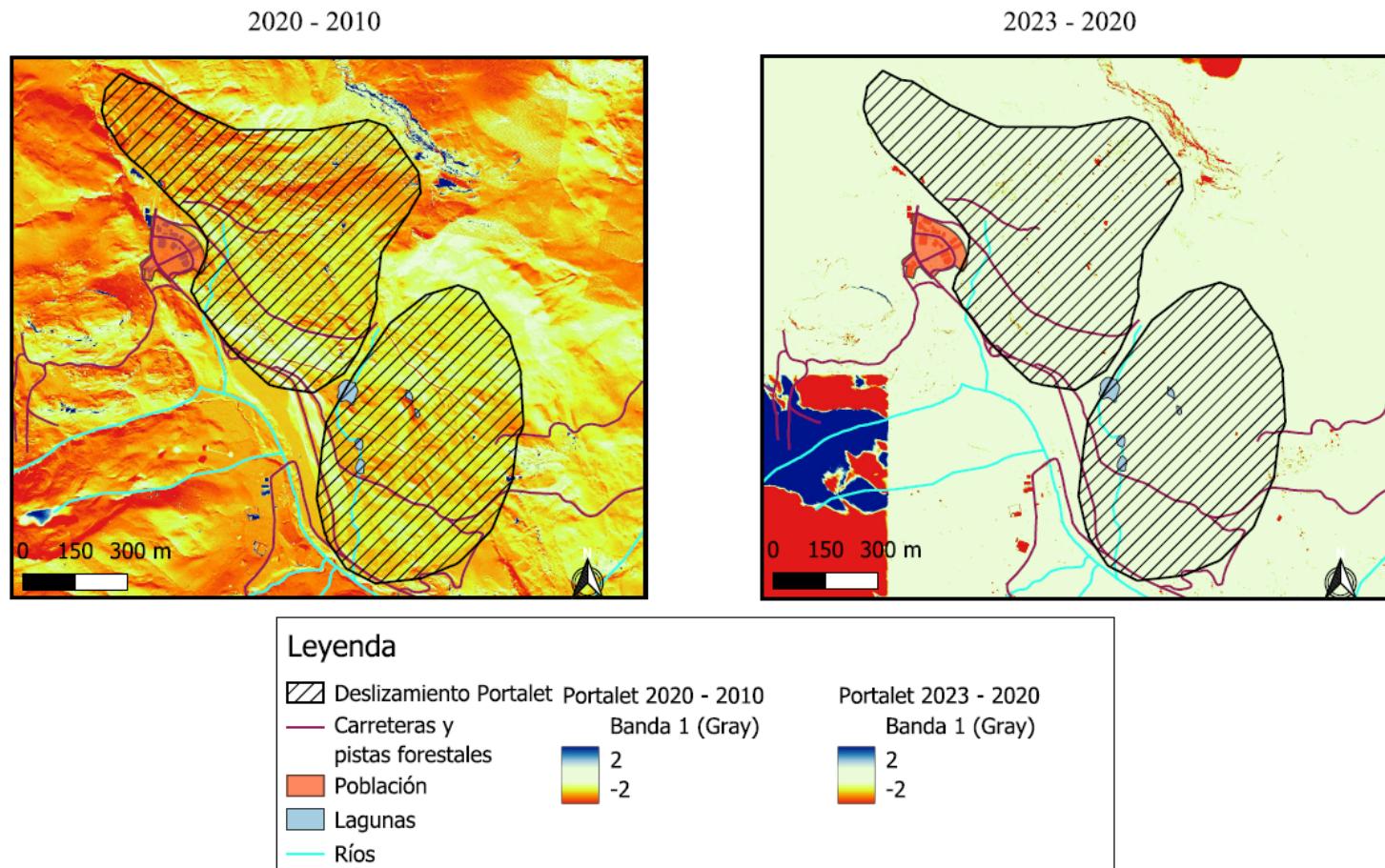


Figura 10: Comparativa temporal del deslizamiento en la estación de esquí del Portalet. Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Análisis mediante datos InSAR

Con datos InSAR hemos realizado otro mapa (Fig. 11) para observar el movimiento de este deslizamiento en los últimos 5 años, entre 2019 y 2023, que coincide y amplía el rango temporal con deformación registrado en los datos LIDAR (2023-2020), tanto en su órbita ascendente como descendente.

En general, se observa una clara diferencia entre el cuerpo septentrional y meridional, con el primero conteniendo un mayor número de puntos de control y medición. Esto es debido a la existencia de grandes bloques de calizas Carboníferas procedentes de caídas desde su cicatriz, que representan buenos reflectores para la técnica del InSAR. Estos bloques están ausentes en el deslizamiento más meridional, con una cicatriz en pizarras devónicas que no aportan bloques.

Independientemente del mayor o menor número de puntos de medición, ambos deslizamientos muestran un comportamiento semejante. En la geometría ascendente, el mapa de velocidades muestra numerosos puntos amarillos que nos indican desplazamientos de 3 a 10 mm. Estas zonas están localizadas en la parte norte y central del primer polígono y 2 puntos en el centro y la parte sur del perímetro del segundo polígono.

En cuanto al mapa descendente, los desplazamientos predominantes en el primer polígono son amarillos, que indican un movimiento entre 3 y 10 mm, y naranjas que oscilan entre 10 y 20 mm, estas agrupaciones se localizan por todo el área del polígono, destacando la zona central y sobre todo la zona norte, donde se observa el mayor movimiento. En el segundo polígono tenemos pequeños puntos de movimiento de colores amarillos localizados en la parte este del polígono. Todos estos datos nos indican un hundimiento progresivo del terreno en ambos deslizamientos, y con ello se evidencia que ambos deslizamientos son activos, sobre todo la parte superior y más cercana a la estación de esquí, con zonas que se mueven a diferentes velocidades ya que la zona superior se mueve más rápido que la central.

La gráfica inferior muestra la deformación con respecto al tiempo para las geometrías ascendente y descendente, en valores promedio y máximos. Las líneas de tendencia de la geometría descendente arrojan valores promedio y máximos de 7 y 9 mm/año, respectivamente.

La comparativa de las tasas de desplazamiento recogidas en este estudio y estudios anteriores llevados a cabo en el deslizamiento más septentrional desde el 2004 tras la reactivación del deslizamiento ayudan a estimar el riesgo de rotura y la fiabilidad de nuestros datos. Los monitoreos de control terrestre entre diciembre de 2004 y marzo de 2005, tras la excavación del pie del derrumbe y la ruptura local arrojaron un desplazamiento total máximo de 51 cm en 102 días (1820 mm/año). Tras la implementación de soluciones de estabilización en los deslizamientos entre 2006 y 2007, los datos de DGPS a InSAR terrestre registraron desplazamientos máximos entre 530 y 1184 mm/año, lo que indica un proceso de desaceleración (Herrera et al., 2009). Posteriormente, datos satelitales tomados

con InSAR a partir de imágenes satelitales de TerraSAR-X midieron hasta 97 mm/año, con las mayores velocidades en la zona de (Herrera et al., 2011). Por último, datos inclinométricos desde abril a noviembre del año 2016 registran velocidades de 30 mm/año (Cobos et al., 2021). Estos datos apuntan al descenso progresivo de las tasas del deslizamiento en busca de su estabilización. Además, estos valores son coherentes con las tasas de desplazamiento registradas en este estudio con tasas máximas de hasta 20 mm/año obtenidas con InSAR a partir de las imágenes sentinel e inferiores a 150 mm/año derivados de la comparación de DEMs obtenidos de las nubes de puntos LiDAR.

Es importante mencionar que la técnica InSAR, para el caso de los deslizamientos del Portalet, muestra una mayor precisión espacial y una cuantificación del movimiento más precisa que el LIDAR, ya que muestra mayor número de puntos con movimiento con datos milimétricos. Finalmente, los datos de desplazamiento obtenidos de la combinación de ambas técnicas, junto con los datos de movimiento históricos, evidencian que ambos deslizamientos están activos, al menos desde el 2004 y fortalecen la necesidad de mantener un seguimiento continuo, especialmente por su uso turístico intensivo de la zona y, en consecuencia, por la alta exposición de la ciudadanía. La monitorización con InSAR permitiría anticiparse a posibles aceleraciones del deslizamiento y a establecer medidas preventivas para reducir el riesgo a la población.

Deslizamiento Estación de esquí de Portalet

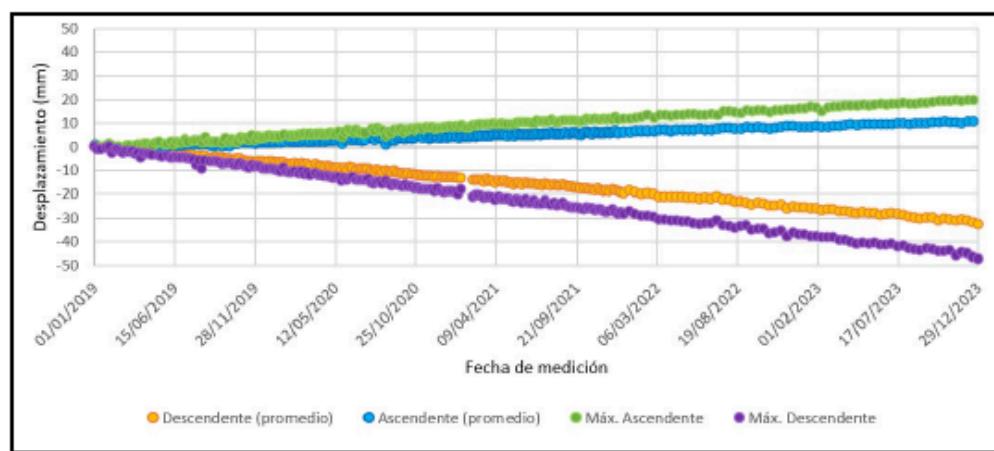
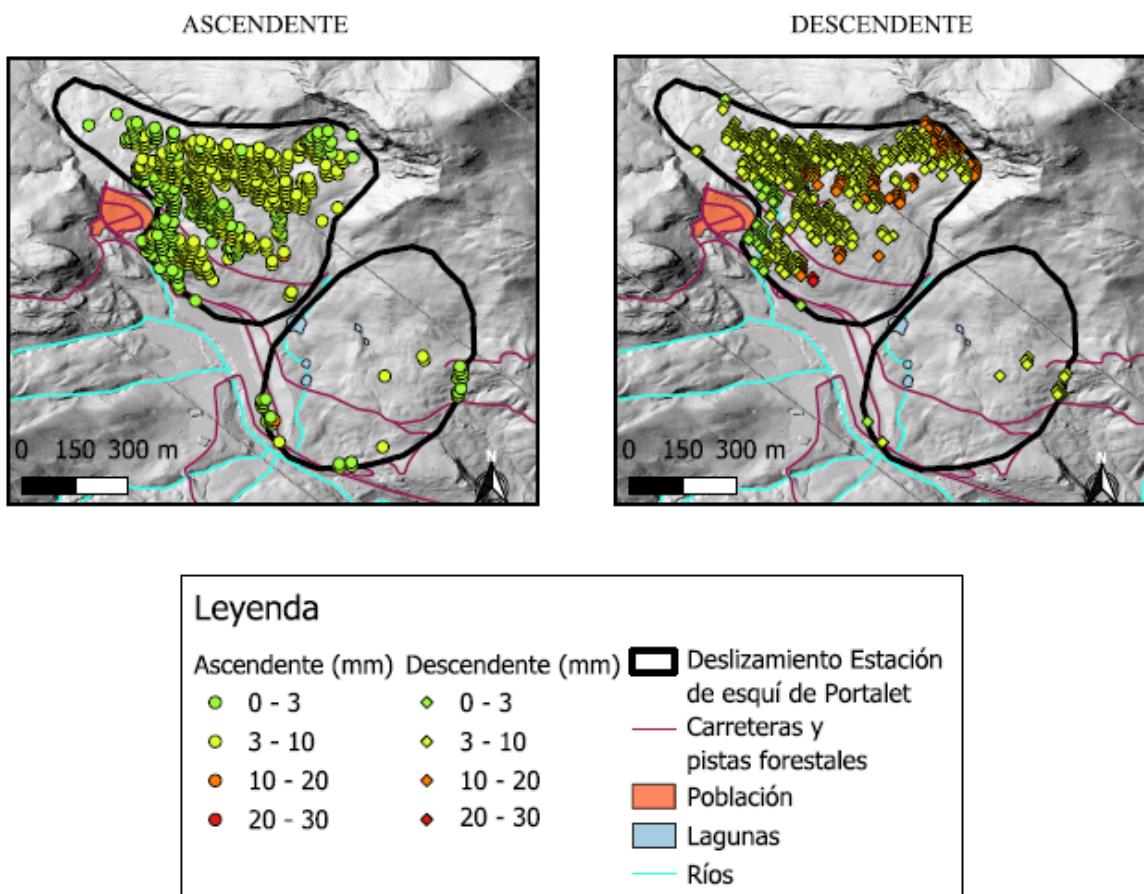


Figura 11: Mapa deslizamiento de la estación de esquí del Portalet. Fuente: Elaboración propia

5.2 Deslizamiento de Formigal

La población de Formigal, en su totalidad, se asienta sobre la masa deslizada de este gran movimiento de tierra. Abarca un área de 1.175.575 m² y su volumen estimado es superior a los 30 hm³ (Guerrero et al., 2012). El desplazamiento del deslizamiento amenaza a todas las viviendas de Formigal, las carreteras de acceso y tránsito por dentro de la población así como las redes de comunicación, desagüe y abastecimiento.

5.2.1 Comparativa temporal con datos LIDAR

Como podemos observar en la figura 12, tenemos una comparativa temporal del deslizamiento de Formigal utilizando las diferencias de los MDE, creados a partir de datos LIDAR que corresponden a los períodos 2020-2010 y 2023-2020.

En los dos mapas se ha utilizado un renderizado en pseudocolor con valores estandarizados que oscilan entre -2 y 2 metros, resaltando los movimientos del terreno. Los valores representados en azul indican un aumento en la elevación, mientras que los colores cálidos, en particular el rojo, reflejan una disminución en la elevación, relacionada con el desplazamiento descendente característico de los deslizamientos. Teniendo en cuenta los errores que tienen los datos LIDAR para cada cobertura, en el mapa que hace referencia al periodo 2020-2010 podemos observar lo mismo que en los anteriores ya que la coloración de los mapas muestra la presencia de artefactos generados por los errores que introduce la nube de puntos del 2010. Las zonas rojas y naranjas nos indicarían que hay pérdida de altitud asociada al desplazamiento del deslizamiento, pero realmente no se aprecia ningún movimiento al realizar los mapas con estos datos.

En el primero de ellos (2020-2010), aparecen áreas puntuales con cambios abruptos y patrones poco coherentes, lo que nos indica que hay errores de interpolación al combinar los MDE de las distintas coberturas LIDAR. En el segundo mapa referente al periodo 2023-2020, no se aprecia color en el deslizamiento por lo que la falta de color indica que no hay movimiento ya que el rango de -0,5 a 0,5 m funciona como un medio visual para reducir interpretaciones erróneas, sin embargo, esto no suprime totalmente los elementos erróneos producidos por variaciones en la densidad.

Únicamente se puede diferenciar en el mapa 2023-2020 una zona activa en la parte superior derecha por encima del deslizamiento, con coloraciones amarillentas y que se corresponde con artefactos en una zona de elevada pendiente próxima a la cicatriz del deslizamiento. Estos datos nos indican que el deslizamiento es inactivo, o más posiblemente que la tasa de desplazamiento es inferior a los 16,5 cm/año.

Comparativa Temporal del Deslizamiento de Formigal

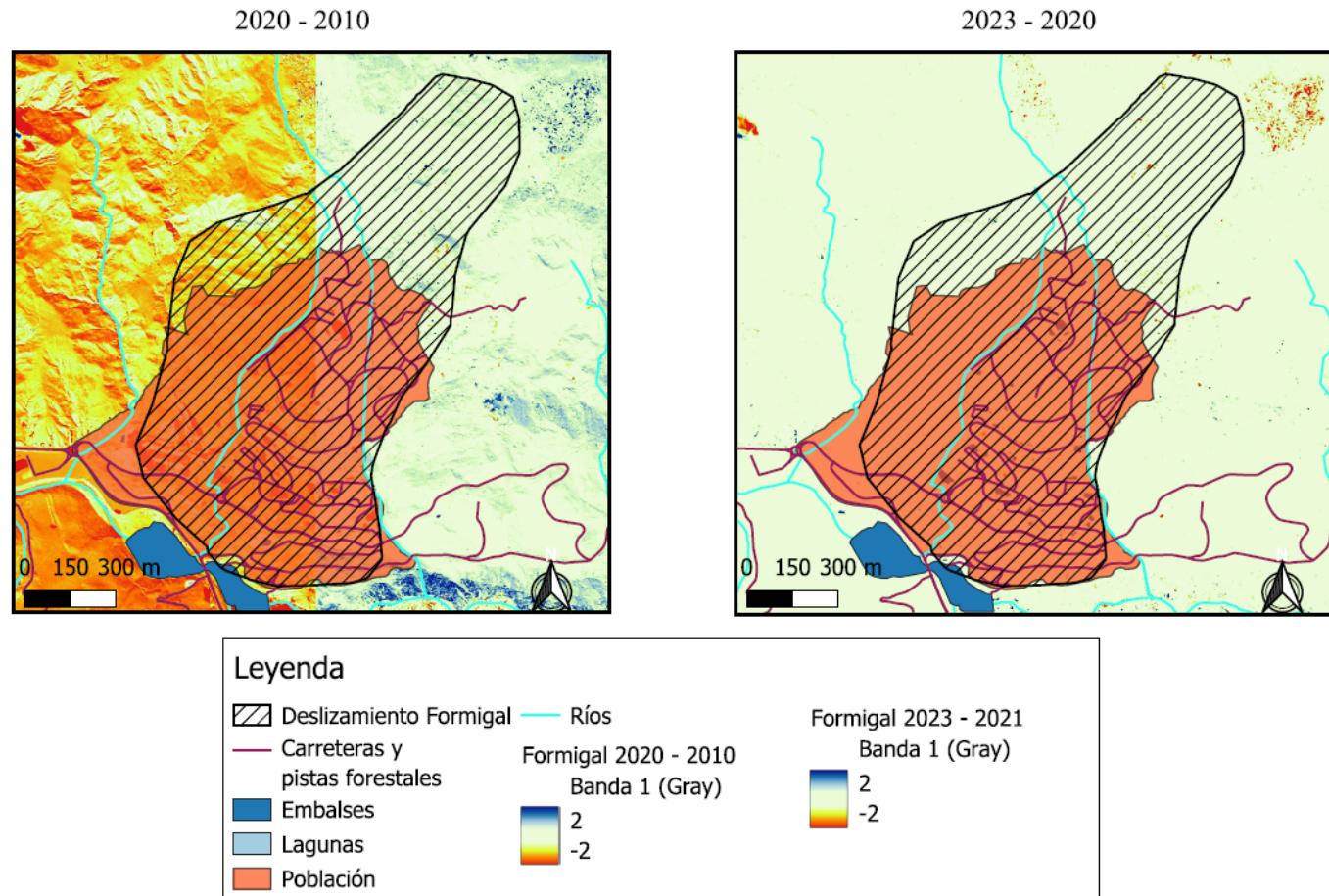


Figura 12: Comparativa temporal del deslizamiento de Formigal. Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Análisis mediante datos InSAR

La Figura 13 es el mapa de velocidad InSAR del deslizamiento en estos últimos 5 años, entre 2019 y 2023 obtenidos del EGMS, tanto en su órbita ascendente como descendente.

Tanto en las geometrías ascendente como descendente, existe un predominio de los puntos verdes o de no movimiento, a excepción de las zonas superiores cercanas a la cicatriz donde domina el amarillo (velocidad de 3-10 mm/año) en la geometría ascendente y el naranja (velocidad de 10-20 mm/año) con algún rojo (velocidad de 20-30 mm/año) en la descendente.

En este caso, la geometría descendente parece más sensible a la componente vertical del movimiento, reflejando una actividad más intensa.

La gráfica inferior nos muestra la deformación con respecto al tiempo para las geometrías ascendente y descendente, en valores promedio y máximos. Las líneas de tendencia de la geometría descendente arrojan valores de desplazamiento promedio y máximos de 8 y 13 mm/año, respectivamente. Estas velocidades coinciden con las detectadas por Herrera et al. (2013) con imágenes de TerraSAR en la banda X en el 2008. Además, en base a lo marcado por Guerrero et al. (2018) sobre la antigüedad de estos movimientos, es previsible que el deslizamiento de Formigal ya estuviera en movimiento mucho antes del 2008.

La combinación de ambas geometrías y los datos InSAR de otros autores confirman que el deslizamiento sigue activo, al menos desde 2008 con tasas de movimiento promedio de entre 1-2 cm/año, aunque algunas zonas puntualmente puedan superar los 2-3 cm/año. A pesar de ser valores de desplazamiento bajas a muy bajas según la clasificación de Hungr et al. (2013), estructuras rígidas como viviendas y carreteras terminan quedando inutilizadas. Por ello sería importante continuar monitoreando su movimiento mediante los datos InSAR para tener un control preciso y continuo que nos permita evadir futuras amenazas.

Por último, al igual que en los deslizamientos del Portalet, la técnica InSAR muestra una mayor precisión espacial mostrando un mayor número de puntos con movimiento que las nubes LIDAR.

Deslizamiento población de Formigal

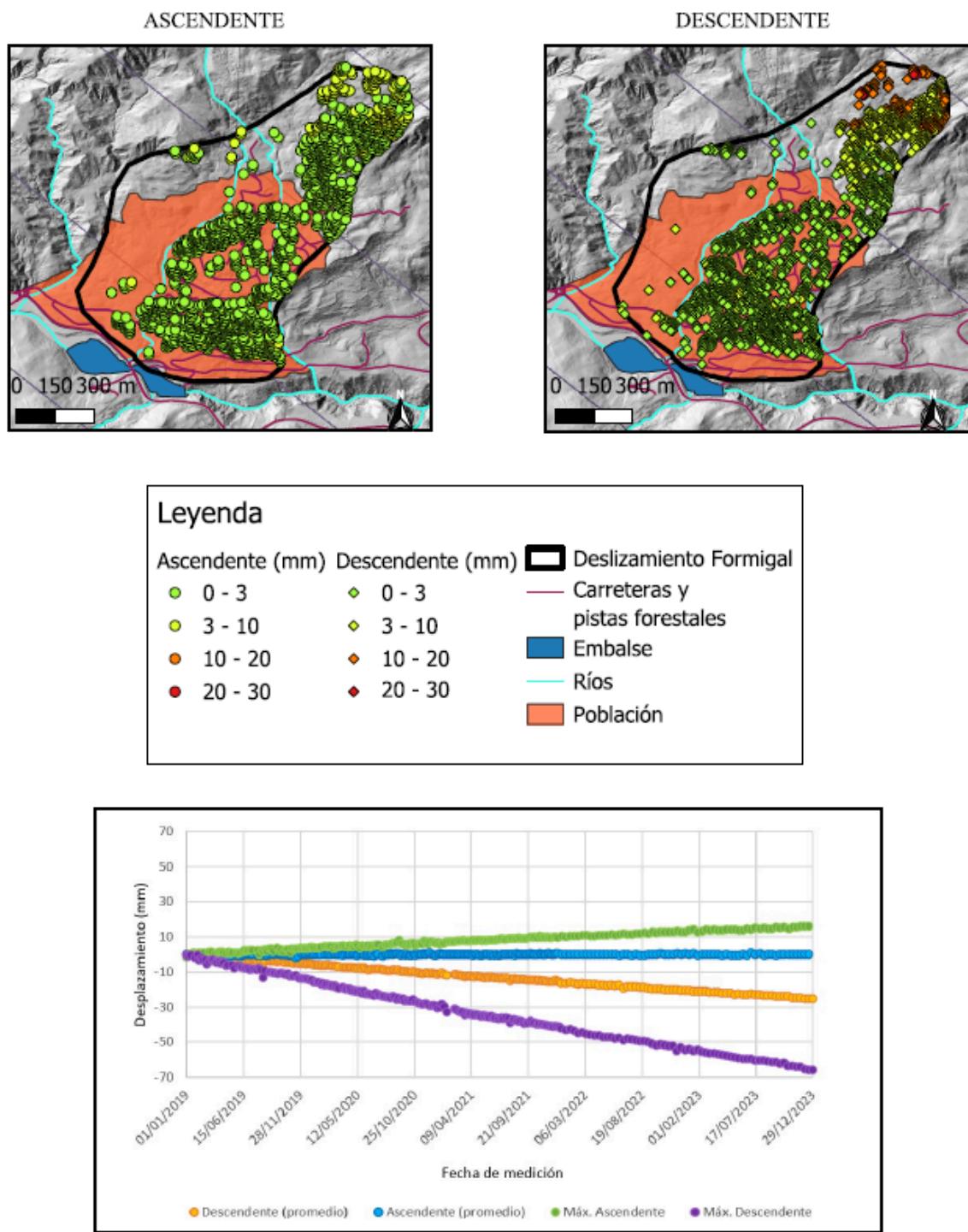


Figura 13: Mapa deslizamiento población de Formigal. Fuente: Elaboración propia

5.3 Deslizamiento del Embalse de Lanuza

Se corresponde con un gran movimiento de tipo translacional, un área de 760.211 m² y un volumen estimado superior a los 25 hm³, que se adentra en forma de lengua en el embalse de Lanuza (Guerrero et al., 2012). Está caracterizado por pendientes pronunciadas y condiciones geológicas frágiles, lo que lo hace muy propenso a deslizamientos complejos como caídas de rocas y flujos de tierra (Guerrero et al., 2012; Herrera et al., 2011, 2013; García-Davalillo et al., 2014). Este deslizamiento supone una amenaza para el embalse y la carretera A-136 que discurre en su parte inferior durante más de un kilómetro.

5.3.1 Comparativa temporal con datos LIDAR

Las diferencias de los MDE, creados a partir de datos LIDAR que corresponden a los períodos 2020-2010 y 2023-2020 muestran ciertas similitudes.

En los dos mapas se ha utilizado un renderizado en pseudocolor con valores estandarizados que oscilan entre -2 y 2 metros, resaltando los movimientos del terreno. Los valores representados en azul indican un aumento en la elevación, mientras que los colores cálidos, en particular el rojo, reflejan una disminución en la elevación, relacionada con el desplazamiento descendente característico de los deslizamientos. Teniendo en cuenta los errores que tienen los datos LIDAR para cada cobertura. En el periodo 2020-2010 se observa una concentración notable de zonas rojizas dentro del área del deslizamiento, sobre todo en su zona media-inferior, que nos indican pérdidas de elevación y desplazamientos de entre -1,2 a 2 m en 10 años a una tasa de 12-20 cm/año. El resto de coloración visible por fuera del deslizamiento, especialmente en la parte inferior izquierda del mapa, son artefactos generados por los errores que introduce la nube de puntos del 2010 por una mala clasificación entre suelo y vegetación.

En el segundo mapa que analiza el desplazamiento entre 2023-2020 se detectan menos cambios significativos de elevación dentro del deslizamiento, pero siguen apareciendo esas zonas rojizas en la parte superior, que nos indican que el terreno se ha desplazado de 1-2 m en estos tres años a tasas de entre 30 y 65 cm/año, indicando claramente una aceleración. Finalmente, las manchas de colores azules y rojos fuera del área del deslizamiento son artefactos generados por los errores que introducen las nubes de puntos.

Esta distribución sugiere que el deslizamiento sigue activo, y con velocidades cada vez mayores.

Comparativa Temporal del Deslizamiento en Lanuza

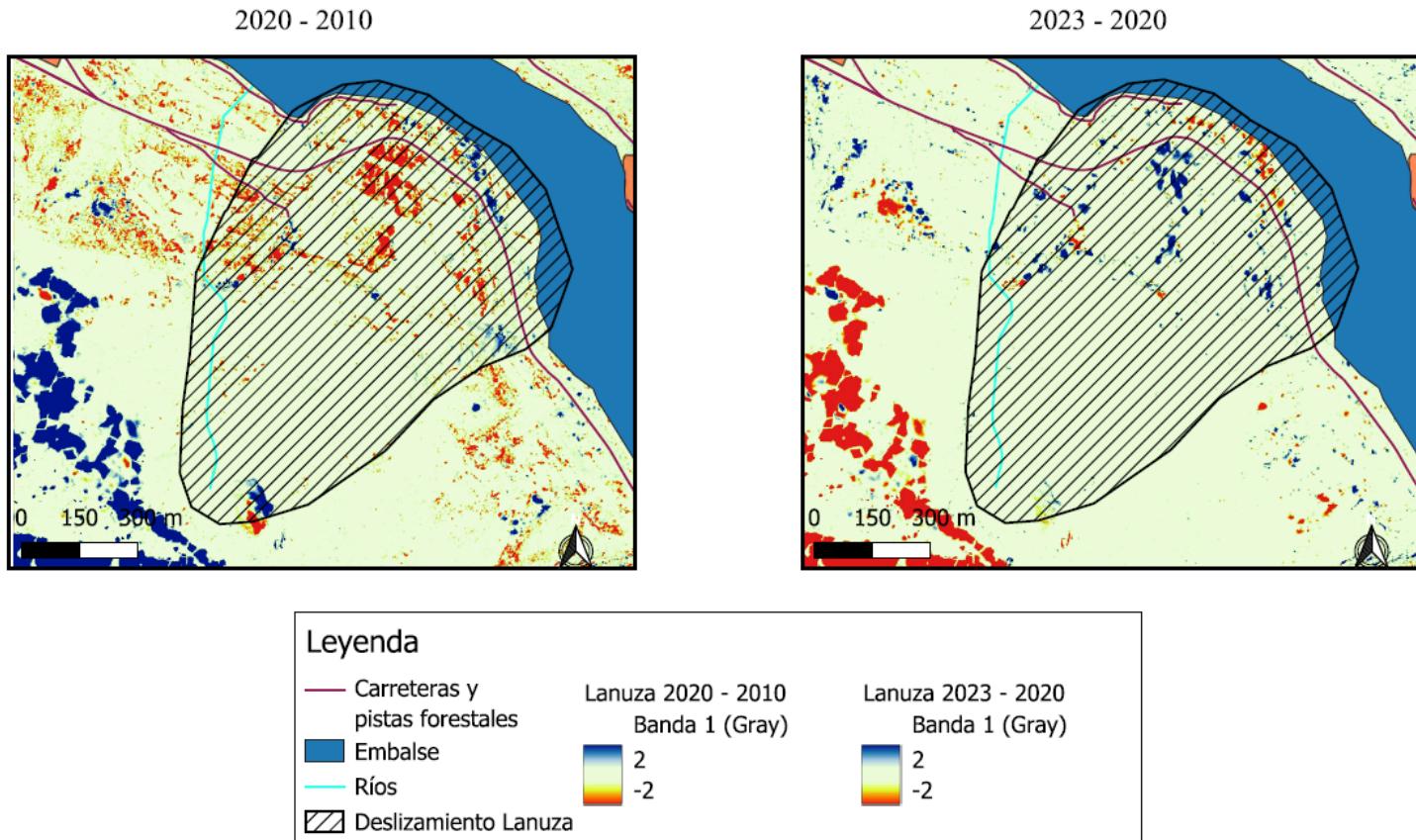


Figura 14: Comparativa temporal del deslizamiento en Lanuza. Fuente: Elaboración propia

5.3.2 Análisis mediante datos InSAR

El mapa de velocidad InSAR (Fig. 15) de los últimos 5 años, entre 2019 y 2023. No aporta gran información. Tanto en la geometría ascendente como descendente el número de puntos de medida es muy bajo, posiblemente debido a la existencia de bloques de roca u otros marcadores geológicos y la existencia de una gran cobertura arbórea que inhibe la recepción de la señal InSAR. A pesar del número reducido de puntos, estos aportan una gran información.

En el mapa de geometría ascendente se observan muy pocos puntos situados en la parte inferior del deslizamiento, de los cuales la mayoría son naranjas, indicando un desplazamiento de 10-20 mm en los últimos cinco años. En cambio en el mapa descendente podemos observar más puntos, la mayoría de ellos de color amarillo, que nos indican un pequeño movimiento entre 3 y 10 mm, localizados también al pie del mismo. Estos datos corroboran lo observado en los datos LIDAR y evidencian que el deslizamiento del Embalse de Lanuza es activo y se mueve a mayor velocidad en la parte más al inferior y más cercana al embalse.

En cuanto a la gráfica inferior podemos observar la deformación con respecto al tiempo para las geometrías ascendente y descendente, en valores promedio y máximos. Las líneas de tendencia de la geometría ascendente arrojan valores promedio y máximos de 8 y 11 mm/año respectivamente, valores que son muy inferiores a los registrados por la diferencia de MDEs derivados de las nubes de puntos LIDAR. Los estudios recientes realizados por Herrera et al. (2013) y Chen et al. (2025) con datos InSAR demuestran que el deslizamiento ha experimentado una tendencia repetida de aceleración, desaceleración y estabilización con un desplazamiento acumulado en la zona inferior de entre 2 y 15 cm entre el 2008 y 2010 y de unos 9,4 cm/año desde el 2017. Estos valores se corresponden mejor con los datos LIDAR que con los datos InSAR aportados por el visor EGMS que claramente infraestiman el movimiento en casi un orden de magnitud. A diferencia de los deslizamientos del Portalet y Formigal, los datos LIDAR consiguen una mayor resolución. Esto es posible a la cobertura vegetal del deslizamiento, que dispersa la señal radar pero que sí permite la entrada de los pulsos LIDAR entre el ramaje hasta alcanzar el suelo.

La observación del movimiento observado en los últimos años a partir de las nubes LiDAR, con una aceleración desde el 2020, plantea preocupaciones en la estabilidad futura de la ladera y los posibles impactos en la infraestructura del valle, además dada su ubicación cerca del embalse de Lanuza y la carretera A-136, es de suma importancia monitorearlo.

Deslizamiento Lanuza

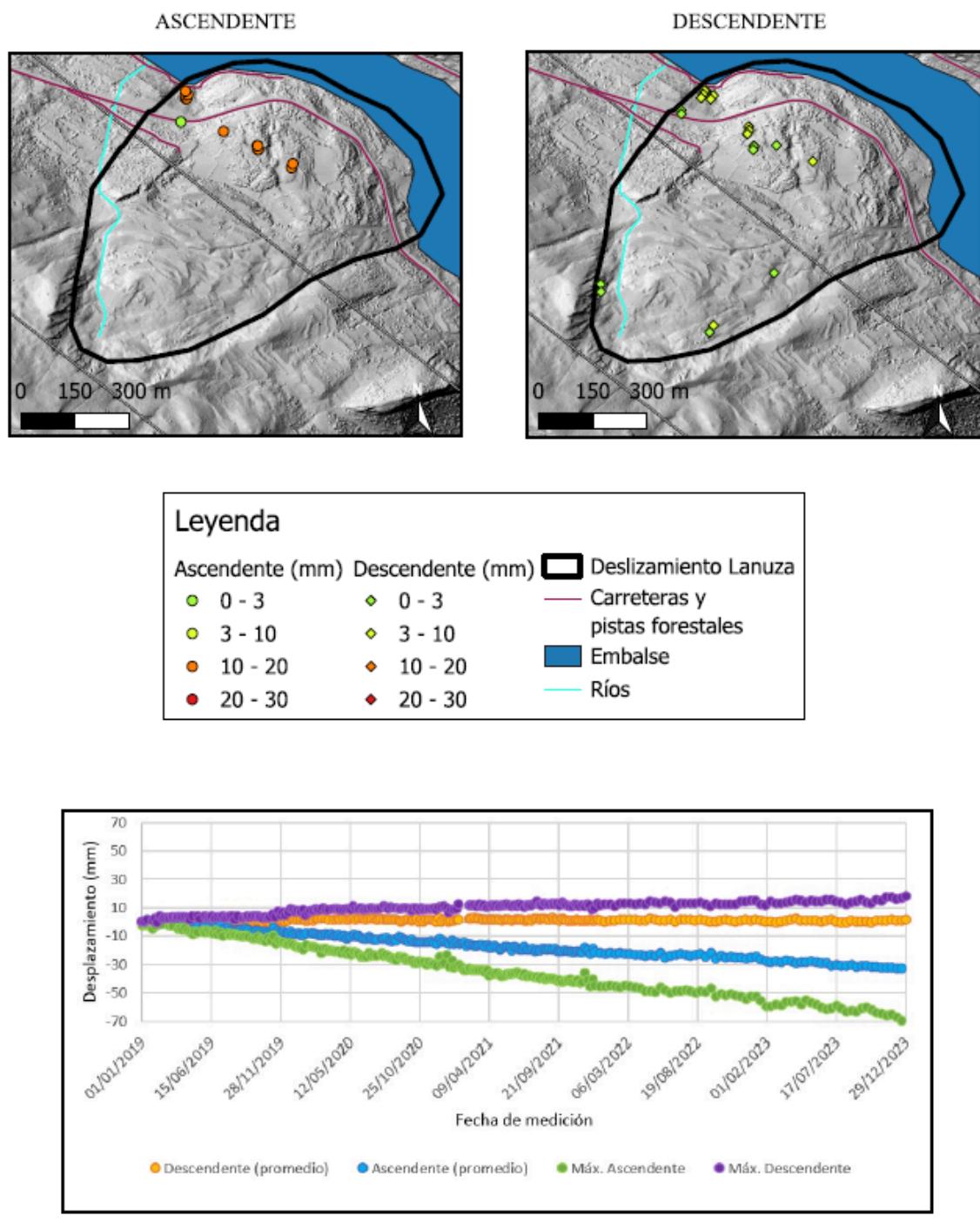


Figura 15: Mapa deslizamiento en Lanuza. Fuente: Elaboración propia

5.4 Deslizamiento del Embalse de Escarra

Este deslizamiento lo encontramos en el municipio de Sallent de Gállego, tiene un área de 325.294 m². El embalse de Escarra fue construido en la década de los 50 sobre la masa deslizada y el desplazamiento de éste supone una seria amenaza hacia la estabilidad de la presa.

5.4.1 Comparativa temporal con datos LIDAR

Las diferencias de los MDE, creados a partir de datos LIDAR que corresponden a los periodos 2020-2010 y 2023-2020 no muestran una tendencia clara.

En el mapa izquierdo que hace referencia al periodo 2020-2010 se aprecia una actividad muy limitada y las diferencias de elevación en el deslizamiento son mínimas, indicando un desplazamiento muy lento o nulo durante esta década. Cabe señalar que las coloraciones azuladas visibles en la imagen son artefactos generados por los errores que introduce la nube de puntos del 2010.

Por el contrario, en el periodo 2023-2020, la parte superior del deslizamiento aparece en colores naranjas y rojizos que indican desplazamientos de entre -1,2 a -2 m en tres años, lo que supone una tasa de desplazamiento de entre -40 y -65 cm/año. La tasa negativa es coherente con su movimiento ladera abajo, perdiendo altitud. De modo que el deslizamiento queda dividido en dos zonas que se desplazarían a diferente velocidad, una superior más rápida y una inferior a menor velocidad. Afortunadamente, esta zona de menor velocidad o con un desplazamiento inferior al umbral de detección del método es la que se encuentra en contacto con la presa.

Finalmente, en la imagen de 2020-2023, también se aprecian otras zonas en tonos naranjas y rojos. Éstas se corresponden con otros deslizamientos activos con tasas de desplazamiento semejantes a las del deslizamiento objeto de estudio, pero que no afectan a la estabilidad de la presa.

Comparativa Temporal del Deslizamiento en el Embalse de Escarra

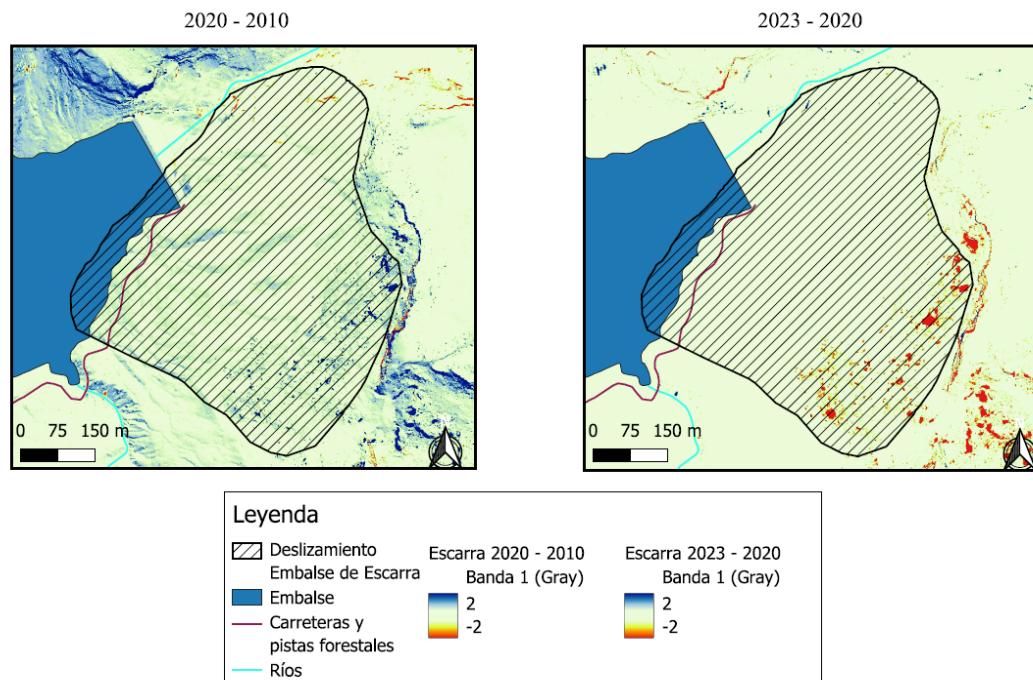


Figura 16: Comparativa temporal del deslizamiento en el embalse de Escarra. Fuente: Elaboración propia

5.4.2 Análisis mediante datos InSAR

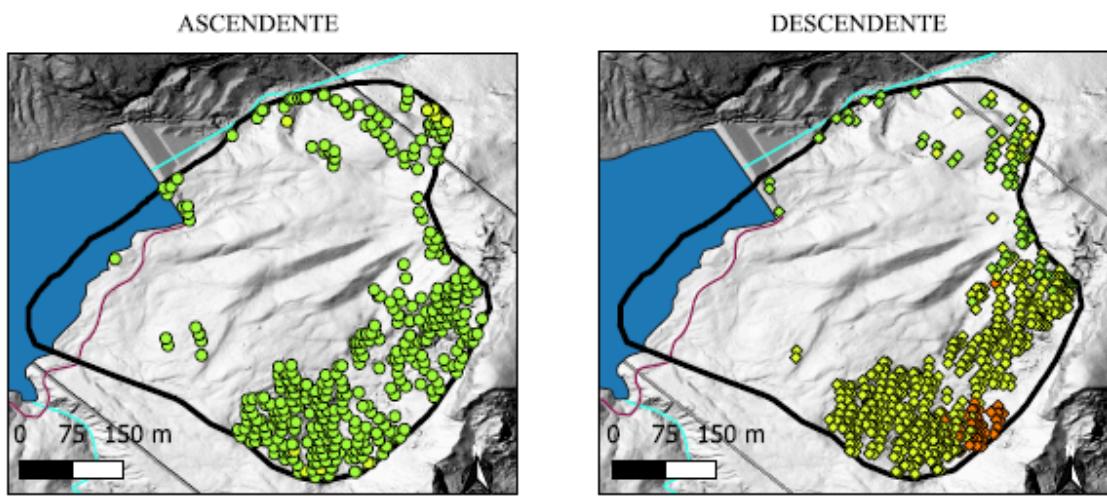
Con los datos InSAR hemos realizado otro mapa (Fig. 17) para observar el movimiento del deslizamiento en estos últimos 5 años, entre 2019 y 2023, que coincide y amplía el rango temporal con deformación registrado en los datos LIDAR (2023-2020), tanto en su órbita ascendente como descendente.

En cuanto al mapa de desplazamiento en la geometría ascendente, no se apreciaría movimiento ya que la mayoría de los puntos pertenecen a la categoría de menor desplazamiento representado con el color verde. En cambio en el mapa de desplazamiento descendente, existe una mayor concentración de desplazamientos significativos, con numerosos puntos en las categorías de 3–10 mm y 10–20 mm, especialmente en la cabecera y zona sureste del deslizamiento. Estos datos corroboran lo observado en los datos LIDAR y evidencian que el deslizamiento del Embalse de Escarra es activo y se mueve a dos velocidades con una zona superior muy activa y una inferior desplazándose a una tasa aproximadamente de un orden de magnitud inferior.

En cuanto al cuadro inferior de la gráfica 17, muestra una gráfica de deformación con respecto al tiempo para las geometrías ascendente y descendente, en valores promedio y máximos. Las líneas de tendencia de la geometría descendente arrojan valores promedio y máximos de 6 y 8 mm/año, respectivamente. Cabe señalar, que estos valores son un orden de magnitud inferior a los registrados por la diferencia de MDEs derivados de las nubes de puntos LIDAR, debido a (Crosetto et al., 2021): (1) por la orientación norte del deslizamiento que impide la detección real del movimiento por la técnica del InSAR y (2) la velocidad real se obtiene de la combinación de los datos ascendentes y descendentes y no únicamente de una sola geometría. A pesar de subestimar la tasa de movimiento, esta técnica muestra una mayor precisión espacial mostrando un mayor número de puntos con movimiento que las nubes LIDAR.

Teniendo en cuenta, que la combinación de ambas técnicas permite considerar al deslizamiento del Embalse de Escarra como un flujo de tierra activo, al menos desde el año 2019, desde que se tienen los datos InSAR. Desafortunadamente, esta es la primera vez que se lleva a cabo un estudio del movimiento de este flujo de tierra y por tanto, desconocemos si ya era activo antes de esta fecha. No obstante, en base a lo marcado por Guerrero et al. (2018) sobre la antigüedad de estos movimientos, es previsible que el deslizamiento del Embalse de Escarra ya estuviera en movimiento mucho antes de este estudio. En este sentido, el desembalse forzado que tuvo lugar en el año 2013, aparentemente sin justificación, podría estar motivado por motivos de seguridad (Diario del Alto Aragón, 2020). La construcción de una presa sobre un deslizamiento de tierra activo plantea una amenaza para la propia infraestructura y las poblaciones situadas aguas abajo con posibles grandes impactos en el futuro. En consecuencia, en base a los resultados de este estudio, que demuestran la actividad presente del deslizamiento, el Embalse de Escarra debería ser controlado con mayor precisión y de manera continua en un futuro.

Deslizamiento Embalse de Escarra



Leyenda

Ascendente (mm)	Descendente (mm)	■ Deslizamiento
● 0 - 3	● 0 - 3	■ Deslizamiento
● 3 - 10	● 3 - 10	■ Embalse de Escarra
● 10 - 20	● 10 - 20	■ Embalse
● 20 - 30	● 20 - 30	■ Carreteras y pistas forestales
		■ Ríos

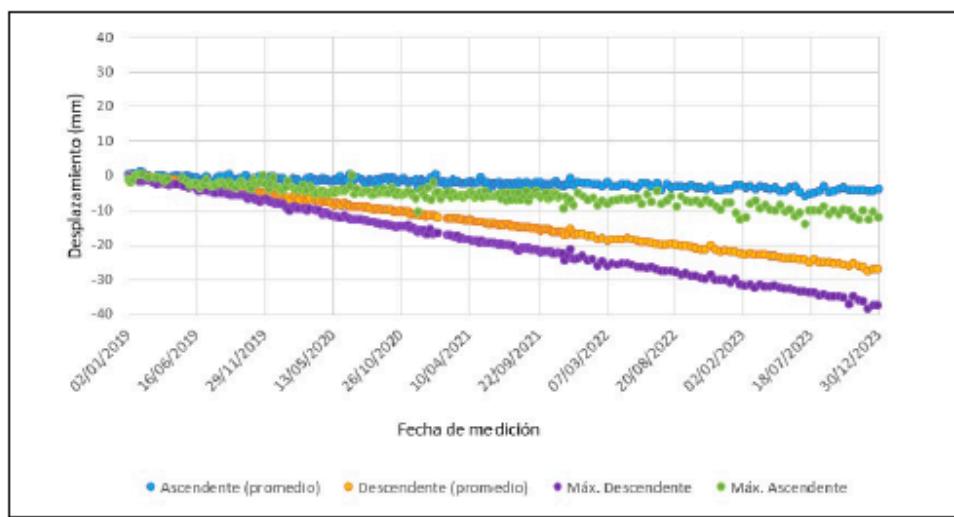


Figura 17: Mapa deslizamiento embalse de Escarra. Fuente: Elaboración propia

5.5 Deslizamiento en urbanización Argualas (Panticosa)

Este deslizamiento abarca un área de 423.821 m², supone una amenaza para los apartamentos turísticos de la Urbanización Argualas, la carretera A-2606 de acceso a Panticosa y, las vías y pistas forestales que permiten el acceso a los pastos de la zona.

5.5.1 Comparativa temporal con datos LIDAR

Las diferencias de los MDE, creados a partir de datos LIDAR no aportan ningún tipo de información, ni el periodo 2020-2010 ni el 2023-2020. Hay que señalar que las coloraciones azuladas y rojizas visibles en ambas imágenes son artefactos generados por los errores que introduce la nube de puntos del 2010 y el crecimiento de la vegetación arbórea.

Comparativa Temporal del Deslizamiento en la Urbanización Argualas (Panticosa)

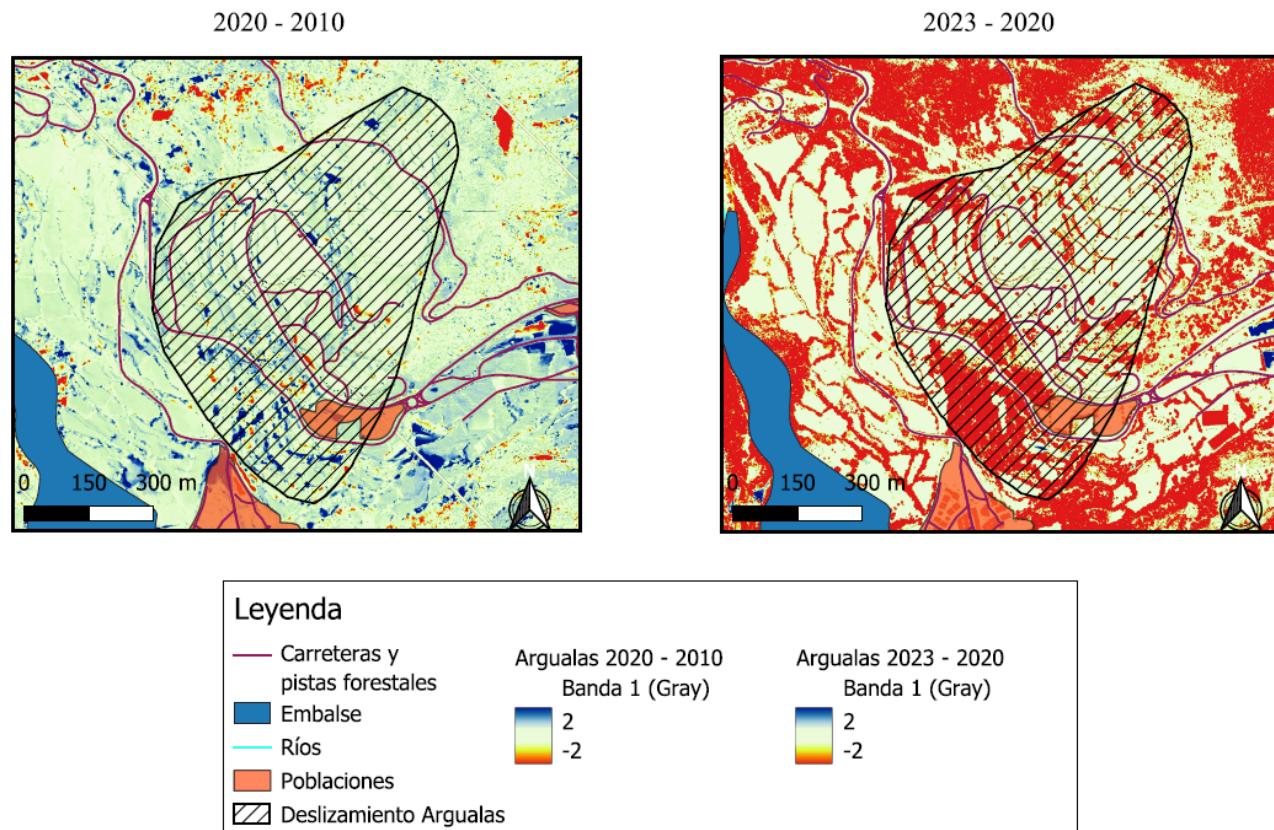


Figura 18: Comparativa temporal del deslizamiento en la urbanización Argualas de Panticosa. Fuente: Elaboración propia

5.5.2 Análisis mediante datos InSAR

Los mapas de velocidad InSAR entre 2019 y 2023 (Figura 19), tanto en su órbita ascendente como descendente muestran patrones semejantes con numerosos puntos de medida en su parte central donde se ubica la Urbanización Argualas. La ausencia de puntos en el resto del cuerpo deslizado se debe a la presencia de una densa vegetación arbórea que dispersa la señal radar.

En el primer mapa de desplazamiento en la geometría ascendente, localizamos varios grupos de puntos de diferentes colores. Como es esperable, la zona fuera del deslizamiento, cuenta con un grupo de puntos verdes que nos indica que en esa zona no se aprecia movimiento. Por el contrario la mayoría de puntos en la zona de la urbanización, en la parte central, son de color amarillo, nos indican un desplazamiento entre 3 y 10 mm. Además, tenemos varios puntos de color naranja indicando desplazamientos de hasta 20 mm.

En la geometría descendente observamos la misma zona verde en el sureste del deslizamiento y mayor movimiento en la zona central ya que ahora predominan los puntos naranjas que indican desplazamientos de 10 a 20 mm con algún punto amarillo. También localizamos un punto rojo en la parte norte del área del deslizamiento que corresponde a una zona que se ha desplazado entre 20 y 30 mm en estos cinco años.

La gráfica de deformación con respecto al tiempo para las geometrías ascendente y descendente, en valores promedio y máximos arrojan valores de 11 y 13 mm/año respectivamente. Con estos valores, se puede considerar que el deslizamiento de Panticosa es un flujo de tierra activo, al menos desde 2019, desde que se tienen los datos InSAR y que los edificios cimentados sobre el deslizamiento se desplazan con el movimiento deformándose junto con la masa en movimiento. Por todo ello, estos resultados enfatizan la urgencia de implementar un seguimiento regular mediante InSAR en la región para prever posibles intensificaciones del fenómeno y evitar daños en las edificaciones e infraestructuras para evitar situaciones de peligro para la comunidad.

Finalmente, cabe mencionar que en este caso, la técnica InSAR muestra una mayor precisión espacial mostrando un mayor número de puntos con movimiento que las nubes LIDAR.

Deslizamiento Urbanización Argualas (Panticosa)

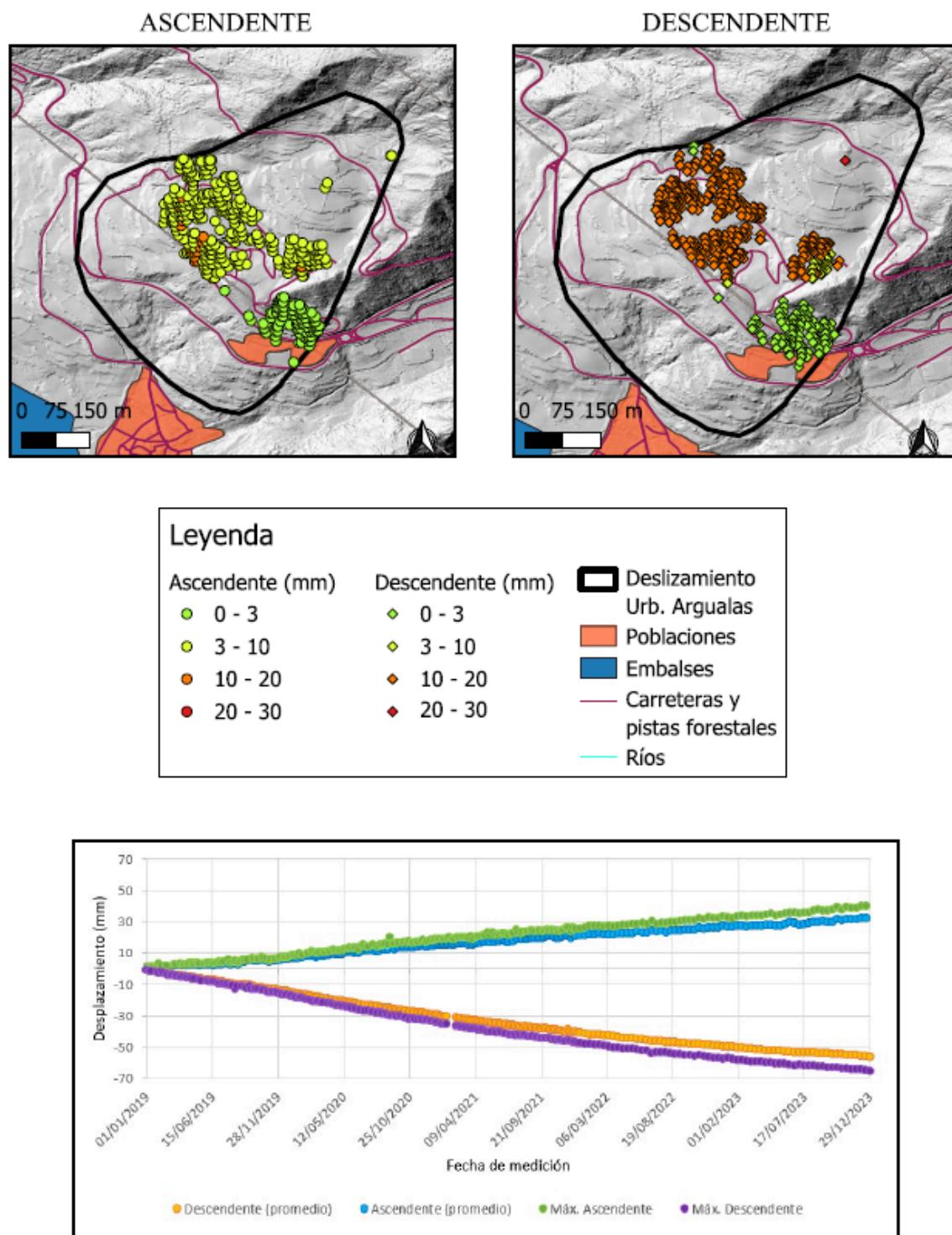


Figura 19: Mapa deslizamiento urbanización Argualas en Panticosa. Fuente: Elaboración propia

6. Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Grado ha facilitado la supervisión efectiva de seis deslizamientos activos localizados en el Valle del Gállego, específicamente en los municipios de Sallent de Gállego y Panticosa, utilizando métodos de teledetección que se basan en datos LIDAR e InSAR. Los hallazgos revelan la relevancia de integrar diversas tecnologías para realizar una caracterización exacta de los procesos de inestabilidad del suelo.

A través de un análisis comparativo, se han logrado las siguientes conclusiones:

- Los datos InSAR nos aportan mayor precisión temporal y sensibilidad milimétrica en la identificación de deslizamientos, lo que permite reconocer patrones de movimiento incluso a tasas de desplazamiento muy lentas. Esta tecnología ha demostrado ser particularmente valiosa en áreas urbanas o de acceso complicado, como Formigal, Argualas o Portalet.
- Los datos obtenidos por LIDAR han demostrado ser fundamentales para el análisis de cambios topográficos a lo largo de períodos intermedios y extensos, especialmente en regiones con vegetación densa donde la señal radar se dispersa y no ofrece resultados. No obstante, la resolución espacial de estos datos y los márgenes de error asociados a las coberturas de 0,5 m complican la interpretación exacta de la velocidad de los deslizamientos, lo que reduce su aplicabilidad en áreas donde los movimientos son lentos y solo es útil en movimientos de masa de velocidades moderadas a rápidas.
- Todos los deslizamientos estudiados muestran evidencias de actividad reciente, aunque varían en su magnitud y distribución geográfica. De forma particular, es importante el caso del deslizamiento en la urbanización Argualas, el del embalse de Escarra y el de la estación de esquí del Portalet, los cuales han evidenciado desplazamientos acumulativos considerablemente significativos, constituyendo un riesgo real para las infraestructuras y los edificios.
- La combinación de estas dos tecnologías dentro de un entorno SIG ha permitido la creación de mapas detallados, lo que mejora la representación de las áreas más activas y apoya el proceso de decisión en la prevención de riesgos geológicos.
- La teledetección se establece como un recurso esencial para la gestión del territorio en regiones montañosas, ya que facilita el seguimiento constante de los procesos geodinámicos complejos.

En conclusión, esta investigación enfatiza la importancia de mantener un monitoreo regular de los deslizamientos en el Valle del Gállego, dando prioridad a la utilización de datos InSAR debido a su superior habilidad para identificar alteraciones leves y su alta frecuencia de adquisición. Los datos obtenidos pueden ser fundamentales para elaborar estrategias de

prevención y sistemas de alerta anticipada, lo que favorecerá la seguridad de la comunidad y la protección de las infraestructuras y el medio ambiente.

7. Bibliografía

Agencia Estatal de Meteorología. Valores climatológicos normales. <https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos#tab1>

Aragón, Geografía & García-Ruiz, José M. & Chueca, J. & Julián, A.. LOS MOVIMIENTOS EN MASA DEL ALTO GÁLLEGO.

Chen, H., Zhao, C., Tomás, R., Reyes-Carmona, C., & Kang, Y. (2025). Integrating InSAR and non-rigid optical pixel offsets to explore the kinematic behaviors of the Lanuza complex landslide. *Remote Sensing of Environment*, 320, 114651. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114651>

Cobos, G., Eguibar, M. A., Torrijo, F.J., Garzón-Roca, J., 2021. A case study of a large unstable mass stabilization: “El Portalet” pass at the central Spanish Pyrenees. *Appl. Sci.* 11, 7176. <https://doi.org/10.3390/app11167176>.

Copernicus. *European Ground Motion Service (EGMS)*. <https://eqms.land.copernicus.eu/>

Crosetto, M., Solari, L., Balasis-Levinsen, J., Bateson, L., Casagli, N., Frei, M., Oyen, A., Moldestad, D. A., Mróz, M., 2021. Deformation monitoring at European Scale: The Copernicus Ground Motion Service. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLIII-B3-2021, 141–146. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-141-2021> . Cruden DM, Varnes DJ (1996) Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides: investigation and mitigation*, transportation research board special report 247. National Academy Press, Washington, DC, pp 36–75

Detektia. *European Ground Motion Service (EGMS)*. <https://detektia.com/european-ground-motion-service/#:~:text=El%20proyecto%20European%20Ground%20Motion%20Service%20%28EGMS%29%20proporciona,del%20terreno%20con%20precisi%C3%B3n%20milim%C3%A9trica%20y%20actualizaciones%20anuales>

Diario del Alto Aragón, 2020. Absueltos cuatro trabajadores de Acciona, acusados del desemblase de Escarra de 2013, <https://www.diariodelaltoaragon.es/noticias/comarcas/alto-gallego/2020/02/07/absueltos-cuatro-trabajadores-de-accion-a-acusados-del-desemblase-de-escarra-de-2013-1195817-daa.html>.

EGMS, 2017. White Paper. [@download/file \(accessed 14 May 2024\).](https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service/d2_d3_combined_sip_psd-1_01_final-1.pdf)

EGMS, 2020. EGMS Implementation Plan and Product Specification Document. <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/egms-white-paper> (accessed 14 May 2024).

Fernández-Merodo, JA, García-Davalillo, JC, Herrera, G. *et al.* Modelado viscoplástico 2D por elementos finitos de deslizamientos de tierra lentos: el caso de estudio de Portalet (España). *Deslizamientos de tierra* 11, 29–42 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0370-4>

García-Davalillo, J.C., Herrera, G., Notti, D., Strozzi, T., Álvarez-Fernández, I., 2014. DInSAR analysis of ALOS PALSAR images for the assessment of very slow landslides: the Tena Valley case study. *Landslides* 11, 225–246 doi:10/f5x24k.

Gobierno de Aragón. Cartografía topográfica 1:1.000 de Aragón. https://idearagon.aragon.es/descargas.jsp?coleccion=Cartografia_1000&utm_source=chatgpt.com

Guerrero J, Gutiérrez F, García-Ruiz JM, Galve JP, Lucha P, Carbonel D, Bonachea J (2012) Landslide 692 map of the upper Gallego Valley (central Spanish Pyrenees). *Journal of Maps* 8:484-491.

Guerrero, J., Gutiérrez, F., García-Ruiz, JM *et al.* Paleolagos de deslizamientos y presas en el Pirineo Central, Valle Superior del Río Gállego, NE de España: cronología y relación con la deglaciación. *Landslides* 15, 1975-1989 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1018-9>

Herrera G, Fernández-Merodo JA, Mulas J, Pastor M, Luzi G, Monserrat O (2009) A landslide forecasting model using ground based SAR data: The Portalet case study. *Eng Geol* 105:220–230

Herrera G, Notti D, García-Davalillo JC, Mora O, Cooksley G, Sánchez M, Arnaud A, Crosetto M (2011) Analysis with C-and X-band satellite SAR data of the Portalet landslide area. *Landslides* 8:195–206

Herrera, G., Gutiérrez, F., García-Davalillo, J. C., Guerrero, J., Notti, D., Galve, J. P., ... & Cooksley, G. (2013). Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees). *Remote Sensing of Environment*, 128, 31-43.

Herrera, G. *et al.* (2017). The Differential Slow Moving Dynamic of a Complex Landslide: Multi-sensor Monitoring . In: Mikos, M., Tiwari, B., Yin, Y., Sassa, K. (eds) *Advancing Culture of Living with Landslides*. WLF 2017. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53498-5_25

Hungr O, Leroueil S, Picarelli L (2013) The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11:167–194, DOI 10.1007/s10346-013-0436-y.

Instituto Geográfico Nacional. Centro de Descargas del CNIG.
<https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/home>

Instituto Geográfico Nacional. INSAR: Interferometría SAR en el IGN.
<https://www.ign.es/web/insar>

Instituto Geográfico Nacional. Tecnología LiDAR: Proyecto PNOA-LiDAR.
<https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar/tecnologia-lidar#:~:text=LiDAR%20es%20el%20acr%C3%B3nimo%20de,tambi%C3%A9n%20denominados%20ecos%20o%20rebotes.>

Instituto Geológico y Minero de España. MAGNA 50: Mapa geológico de España 1:50.000.
<https://mapas.igme.es/Servicios/default.aspx#IGME MAGNA 50>

Marti Bono, C E (1978) . «Aspectos de la problemática geomorfológica del Alto Aragón Occidental». Estudios geográficos núm. 153, págs. 473-493.

Pueblos Vivos Aragón. Jacetania y Alto Gállego.
<https://pueblosvivosaragon.com/jacetania-y-alto-gallego/>

Ríos LM, Balera J, Baretino D (1989) Memoria de la Hoja N° 145 del Mapa Geológico de España: Sallent, E. 1/50,000. ITGE, Madrid

Schuster RL, Highland LM (2007) The third hans cloos lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies. Bull Eng Geol Environ 66:1–27

Turner AK, Schuster RL (2012) Rockfall: evaluation and control. Transportation research board report. National Academy Press, Washington DC

Turner, A.K. Social and environmental impacts of landslides. *Innov. Infrastruct. Solut.* 3, 70 (2018). <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0175-y>

VALERO, J. (1974): «Geologie Structurale du Pelozoïque de la région de Panticosa, provincia de Huesca, España). These Doct: Sciences Bordeaux III, págs. 1-78.

WENSINK, H. (1962): «Paleozoico of the Gállego and Arán valleys, Huesca province, Spanish Pyrenees». Estudios Geológicos, 18, págs. 1-74.