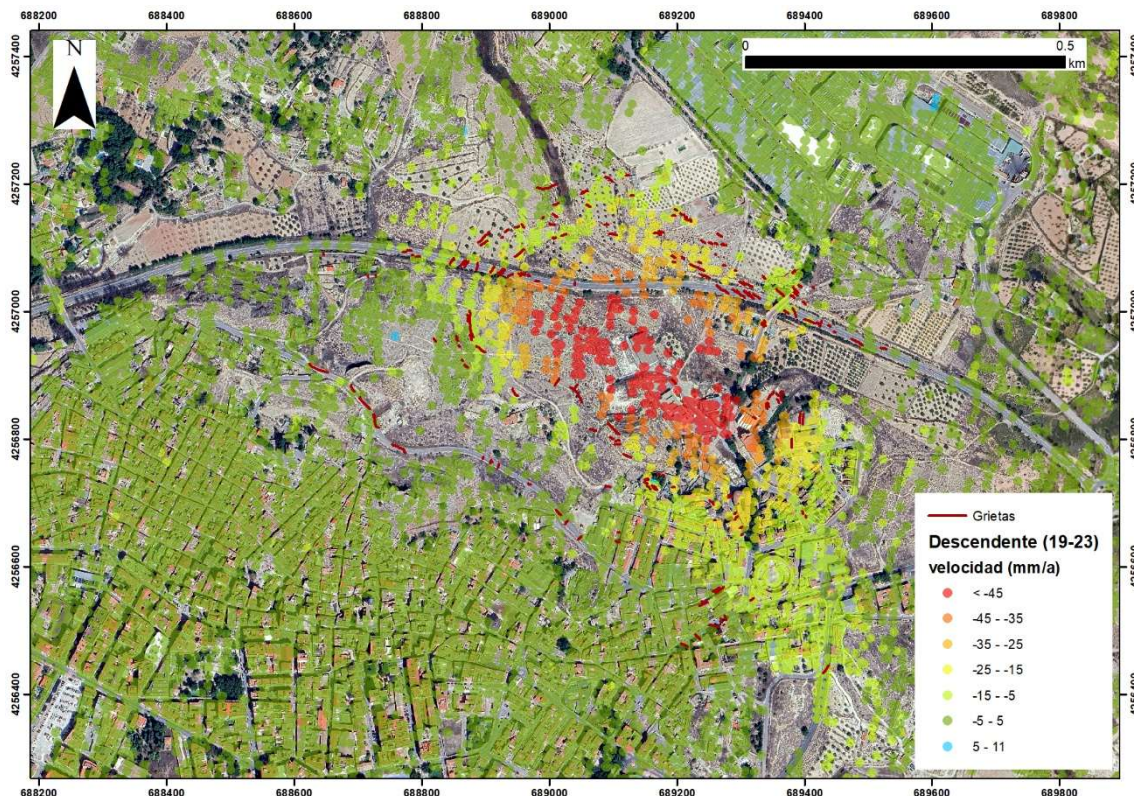




Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# INFORME SOBRE LAS DEFORMACIONES OBSERVADAS EN EL SECTOR NE DEL CASCO URBANO DE MONÓVAR (MONÓVAR, ALICANTE)



5 de enero de 2026

**Coordinadores del contrato:** Roberto Tomás Jover y José Luis Pastor Navarro

**Dpto. de Ingeniería Civil. Universidad de Alicante**

**Peticionario:** Excmo. Ayto. de Monóvar

Universidad de Alicante

## Índice

1.	Peticionario .....	9
2.	Objetivo .....	9
3.	Descripción geológica de la zona .....	10
4.	Antecedentes .....	11
5.	Interferometría SAR diferencial .....	12
5.1.	Fundamentos de la técnica DInSAR .....	12
5.2.	Adquisición de los datos SAR .....	12
5.3.	Principios de interferometría SAR .....	14
5.4.	European Ground Motion Service.....	15
5.5.	Umbral de estabilidad InSAR .....	16
6.	Metodología de trabajo.....	16
6.1.	Datos InSAR .....	16
6.2.	Identificación y cartografía de grietas en el terreno y daños .....	17
6.3.	Toma de muestras de agua .....	17
7.	Resultados.....	18
7.1.	Cartografía de deformación .....	18
7.1.1.	Periodo 2016-2021.....	18
7.1.2.	Periodo 2019-2023.....	21
7.2.	Serie temporal InSAR .....	26
7.3.	Grietas en el terreno y estructuras de flexión superficial.....	27
7.4.	Análisis de agua .....	32
8.	Análisis conjunto de la información.....	33
9.	Conclusiones .....	36
10.	Recomendaciones.....	38

Universidad de Alicante



## Índice de figuras

Figura 1. Localización de la zona de estudio considerada en este informe. El recuadro blanco delimita de forma aproximada la zona interés estudiada mediante datos de interferometría SAR. Imagen de Google Earth. ....	9
Figura 2. Mapa geológico de Monóvar (Leret Verdú et al., 1976). ....	11
Figura 3. Esquema de la geometría de adquisición de imágenes SAR (Bru et al., 2024). El satélite se desplaza en la dirección de vuelo, azimut, orbitando a una altura $h$ de 693 km, mientras que la distancia que une la antena con el blanco la denominamos range (rango). Se conoce como LOS (Line-Of-Sight) a la línea que une el satélite con el punto en la superficie terrestre que estamos observando. El satélite emite con cierta inclinación para evitar ambigüedades en la respuesta. El ángulo de inclinación depende del satélite. Para el caso de Sentinel-1 este ángulo de inclinación oscila entre los $33^\circ$ en la parte de la imagen más cercana al satélite y $43^\circ$ en la más lejana. Mediante el SAR medimos distancias en la dirección LOS. ...	13
Figura 4. Localización de los puntos de toma de muestras de agua para su posterior análisis..	18
Figura 5. Datos de velocidad de desplazamiento a lo largo de la línea de vista (LOS) medidos a partir de órbitas ascendentes y descendente del periodo 2016-2021. ....	19
Figura 6. Datos de velocidad de desplazamiento horizontal (E-O) y vertical obtenidos a partir de la descomposición geométrica de los desplazamientos LOS del periodo 2016-2021. ....	20
Figura 7. Datos de velocidad de desplazamiento a lo largo de la línea de vista (LOS) medidos a partir de órbitas ascendentes y descendente del periodo 2019-2023. ....	22
Figura 8. Datos de velocidad de desplazamiento horizontal (E-O) y vertical obtenidos a partir de la descomposición geométrica de los desplazamientos LOS del periodo 2019-2023. ....	23
Figura 9. Mapa de desplazamientos verticales durante el periodo 2019-2023 de todo el casco urbano de Monóvar en el que se observa como los desplazamientos de la zona estudiada se extiende hacia el sur con menor intensidad. ....	24
Figura 10. Secciones transversales de las velocidades verticales de desplazamiento medidos a través de la cubeta de asiento para los periodos 2016-2021 (azul) y 2019-2023 (negro): (a) sección A-A'; (b) Sección B-B'.....	25
Figura 11. Series temporales de desplazamiento vertical de varios puntos representativos de la zona de estudio: (a) Localización de los puntos seleccionados; (b) Evolución temporal de los desplazamientos verticales (periodo 2019-2023). $v$ representa la velocidad media del desplazamiento en mm por año. ....	26
Figura 12. Distribución de grietas en el terreno dispuestas de forma concéntricas a la zona deformada. ....	27
Figura 13. Grietas en el terreno: a) Grieta de orientación aproximada N-S y de reducida apertura situada en la zona de Els Clots. b) Grieta incipiente de escasa persistencia y apertura (Els Clots). c) Grieta situada en un bancal de olivos junto a la CV-83 parcialmente cubierta de vegetación. d) Grieta de grandes dimensiones parcialmente erosionada situada en un bancal de olivos situado junto a la CV-83. e) Prolongación hacia el norte o de la grieta mostrada en figura d). f) Grieta de gran persistencia, apertura y profundidad desarrollada en un depósito de terraza cementado junto a la CV-83. ....	28
Figura 14. Grietas afectando a elementos constructivos: a) Grietas en firme y muro con elevada continuidad de la calle San Blas. b) Grietas (flechas rojas) en muro y fachada de vivienda, y levantamiento del pavimento de la acera por esfuerzos de compresión en la calle Raval Cuartel. Obsérvese también la deformación de las placas del zócalo de la vivienda. c) Aspecto de las grietas de la calle San Blas mostradas en la figura a) en el otro lado de la calle, con	

continuidad en la acera y el edificio. d) Grieta en el pavimento de la Calle Mayor a lo largo de la cual existen numerosas grietas adicionales paralelas y de orientación similar.....	29
Figura 15. Grietas activas en la CV-835 identificadas en las imágenes históricas de Google Street View. a) Grietas reparadas el tramo comprendido entre la Calle Mayor y el Raval de Sant Pere en octubre de 2022. En Google se identifican grietas en este sector desde, al menos, 2009. b) y c) Patrones de grietas en la curva de a CV-835 a la altura del Arrabal Ronda Forca. La grieta aparece en 2013 y 2022. Actualmente, se ha vuelto a desarrollar con un patrón similar al de 2013.....	30
Figura 16. Estructuras de flexión por compresión identificadas en el Camino del Cementerio, en las inmediaciones de la comisaría de la Policía Local de Monóvar y en el extremo oeste de la calle Raval Cuartel. ....	31
Figura 17. Panorámica de la zona principal del núcleo urbano afectada por las deformaciones. La delineación del límite de la zona afectada por subsidencia es aproximada. ....	36
Figura 18. Esquema de una dolina de flexión en la cobertera generada por una disolución interestratificada de niveles salinos (adaptado de De Waele & Gutiérrez, 2022).....	37
Figura 19. (a) Mapa de superposición de datos InSAR (2019-2023), daños, grietas, contornos de igual desplazamiento y envolvente. (b) Mapa de líneas de isodesplazamiento. La curva discontinua define la envolvente de los desplazamientos superiores a 3 mm/año ( $\sim 4\sigma$ ). (c) Mapa de envolvente de daños y grietas. ....	40

## Índice de tablas

Tabla 1. Características principales de los datos del EGMS usados en este estudio (European Ground Motion Service, 2025).....	16
Tabla 2. Periodos temporales de los procesados InSAR empleados en este informe. (*) Los datos Calibrated cubren el periodo 2015-2021, mientras que los datos Ortho cubren el periodo 2016-2021. ....	17
Tabla 3. Valores de conductividad y pH medidos en las muestras de agua tomadas en la zona de estudio.....	32
Tabla 4. Resultados de la concentración de aniones y cationes obtenidos en el análisis de las muestras de agua mediante cromatografía iónica. ....	33

Universidad de Alicante

# Informe sobre las deformaciones observadas en el sector NE del casco urbano de Monóvar (Monóvar, Alicante)

## 1. Peticionario

El presente informe sobre las deformaciones observadas en el sector NE del casco urbano de Monóvar (Monóvar, Alicante) se realiza para el siguiente cliente:

- Cliente: Excelentísimo Ayuntamiento de Monóvar
- Dirección: Plaza de la Sala, 1; 03640 Monóvar; Alicante
- CIF: P0308900J

De aquí en adelante se referirá al cliente como Ayuntamiento.

## 2. Objetivo

El objeto del presente informe es la realización de un estudio sobre los desplazamientos de la superficie del terreno en el sector NE del casco urbano de Monóvar (Alicante) y su entorno (Figura 1) a partir de datos obtenidos mediante Interferometría SAR diferencial (InSAR). Para ello se han empleado imágenes de satélite de la misión de la Agencia Espacial Europea (ESA) Sentinel-1. El periodo estudiado en este informe comprende el intervalo de tiempo comprendido entre los años 2016 y 2023.



Figura 1. Localización de la zona de estudio considerada en este informe. El recuadro blanco delimita de forma aproximada la zona interés estudiada mediante datos de interferometría SAR. Imagen de Google Earth.

### 3. Descripción geológica de la zona

Monóvar está situado en la comarca del Medio Vinalopó, en la provincia de Alicante. Se encuentra en el sector este de la unidad geográfica de la Depresión de Elda-Petrer-Monóvar. Su término municipal cuenta con una superficie de aproximadamente 152 km<sup>2</sup>.

Desde el punto de vista geológico, la zona de estudio se sitúa dentro del dominio Prebético Interno de la Cordillera Bética (Leret-Verdú & Lendinez-González, 1974), sobre un manto salino (*salt sheet* en inglés) de evaporitas triásicas (facies Keuper). Dicho manto salino corresponde a un cuerpo alóctono de evaporitas triásicas que emergió a la superficie en el Oligoceno superior y se desplazó lateralmente mediante deformación plástica sobre unidades más recientes (Canova et al., 2025). En superficie se manifiesta como yesos, arcillas y margas versicolores intensamente deformados que corresponden al material que ha permanecido tras la disolución de la sal cerca de la superficie (residuo de disolución). Aunque carecemos de datos de sondeos profundos, bajo este material residual o *caprock* debe existir una zona en la que todavía persiste la sal, tal y como indican los diversos manantiales salinos asociados al Keuper en el entorno de Monóvar (Andreu et al., 2010; Andreu et al., 2025; Canova et al., 2025).

Los materiales que afloran en el núcleo urbano corresponden fundamentalmente al sustrato triásico de la facies Keuper, el cual se encuentra en amplios sectores cubierto por depósitos fluviales cuaternarios, correspondientes tanto a secuencias escalonadas de terraza como a fondos de valle (Leret-Verdú & Lendinez-González, 1974).

Los materiales del Keuper afloran en buena parte de la zona objeto de este informe, en la franja delimitada por el casco urbano y la carretera CV-83. Estos afloramientos forman una serie de lomas que alcanzan los 440 m s.n.m. en un cerro situado en las proximidades del Castillo de Monóvar y de la Ermita de Santa Bárbara. Cabe mencionar que en la cartografía oficial de esta zona aparecen topónimos como “Els Clots de Faio” o “Carretera dels Clots”, donde el término “Clot” suele hacer mención a un hoyo en el suelo, una depresión natural del terreno o un agujero excavado.

En la zona urbana situada al NE, en el entorno de Carrer del Cementeri hacia la CV-83, parece apreciarse la existencia de rellenos antrópicos, hecho que viene corroborado por los sondeos realizados en el estudio geotécnico con fecha 17 de febrero de 2021 por el laboratorio CYTEM S.L. para el CEIP Escritor Canyís. También se aprecian rellenos antrópicos en algunos puntos del entorno del paraje de Els Clots de Faio.

La zona situada al norte de la CV-83 dentro del área de estudio está constituida por terrazas cuaternarias dedicadas a la actividad agrícola.

La Rambla del Charco cruza la CV-83 en dirección aproximada NO-SE, para posteriormente girar bruscamente en dirección ESE. En los márgenes del barranco se observan depósitos de gravas cementadas con paleodolinas correspondientes a terrazas fluviales, mientras que el fondo del barranco está constituido por sedimentos fluviales recientes no consolidados.

Asimismo, en la Rambla del Charco, próxima a dicho cementerio, se reconocen vestigios de terrazas consolidadas que muestran una inclinación aproximada de 20° hacia el este (Leret-Verdú et al., 1976).



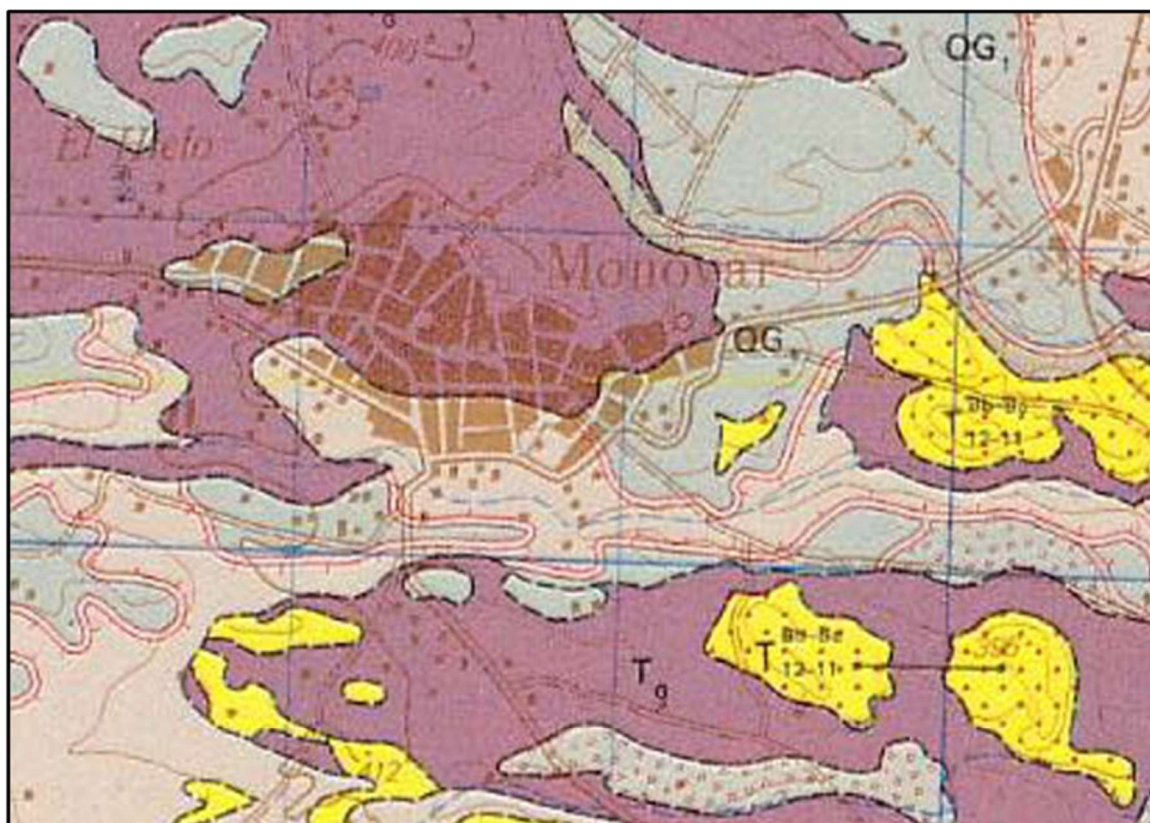


Figura 2. Mapa geológico de Monóvar (Leret Verdú et al., 1976).

#### 4. Antecedentes

A continuación, se describen brevemente los antecedentes administrativos más relevantes relacionados con este trabajo:

- A mediados de octubre de 2025, los profesores que suscriben el presente informe contactaron por teléfono con el Ayuntamiento de Monóvar para informar de la existencia de unas deformaciones importantes en la zona noreste del municipio identificadas mediante el Servicio de Movimientos del Terreno Europeo (EGMS en inglés). A raíz de esa llamada se concretó una reunión presencial para exponer las observaciones realizadas en la zona.
- El miércoles 5 de noviembre, se mantuvo una reunión con el alcalde, el concejal de Política Territorial y Ambiental, Patrimonio y Agricultura y los técnicos municipales del Ayuntamiento de Monóvar. Durante dicha reunión se expusieron los hallazgos realizados por algunos de los profesores de la Universidad de Alicante que suscriben este informe.



- El lunes 10 de noviembre, a petición del Ayuntamiento de Monóvar, algunos de los profesores autores del presente informe participamos en una reunión con la Dirección Territorial de Educación de Alicante de la Generalitat Valenciana, por invitación del Ayuntamiento de Monóvar, por las posibles implicaciones que los desplazamientos del terreno detectados pudieran tener en las obras a realizar en el CEIP Escripitor Canyís.
- El día 20 de noviembre, se remitió al Ayuntamiento de Monóvar el presupuesto para la formalización del contrato de asesoría con la Universidad de Alicante para realización del presente informe.
- El departamento de contratación del Ayuntamiento de Monóvar remitió a la UA un formulario de contrato menor, que fue devuelto al Ayuntamiento debidamente cumplimentado al día siguiente.
- El día 16 de diciembre se recibió en la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la UA la adjudicación del contrato y se comenzó la elaboración del presente informe.

## 5. Interferometría SAR diferencial

### 5.1. Fundamentos de la técnica DInSAR

La interferometría SAR (*Synthetic Aperture Radar*), InSAR, es una técnica de teledetección ampliamente utilizada para la monitorización de movimientos de la superficie terrestre. La técnica DInSAR (InSAR diferencial) explota las diferencias de fase entre dos medidas SAR, llamada fase interferométrica, para obtener información de la topografía del terreno y de los movimientos ocurridos entre ambas adquisiciones. Si la topografía del terreno es conocida, es decir se dispone de un modelo digital del terreno, la contribución de la topografía a la diferencia fase puede ser eliminada, quedando solo la componente relacionada con los movimientos del terreno. Esto hace posible la detección de movimientos del terreno en grandes extensiones y con tasas de pocos milímetros al año. La técnica DInSAR ha sido utilizada exitosamente en diferentes aplicaciones. En Crosetto et al. (2015) y Bru et al. (2004) se puede encontrar una revisión general tanto de las técnicas como de las aplicaciones.

La técnica DInSAR consiste en el tratamiento y análisis de la información obtenida a partir de la comparación de imágenes SAR. El proceso incluye diferentes operaciones: la adquisición de los datos, la elaboración de interferogramas y la generación de mapas de movimientos. A continuación, se describen brevemente que es una adquisición de este tipo de sistemas y los principios fundamentales de la técnica DInSAR.

### 5.2. Adquisición de los datos SAR

El satélite Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea opera en una órbita a unos 700 km de altura y una velocidad de aproximadamente 8 km/s. Su antena emite pulsos de microondas a intervalos regulares, que se propagan por la atmósfera hasta la superficie terrestre y generan ecos al interactuar con el terreno. Estos ecos son posteriormente recibidos por el propio satélite. La repetición continua del proceso de emisión y recepción a lo largo de la órbita permite generar una imagen bidimensional del terreno con dos direcciones principales: la dirección *range* o línea de vista (LOS: *Line Of Sight*), que une el satélite con el punto observado, y la dirección azimut, paralela a su trayectoria.



### 5.3. Principios de interferometría SAR

Cuando se emplean dos imágenes SAR, denominadas *master* y *slave*, estas pueden proceder de distintos satélites o del mismo satélite captadas en pasadas diferentes sobre la misma zona. La imagen adquirida en primer lugar actúa como *master* (imagen primaria), mientras que la segunda actúa como *slave* (imagen secundaria). Dado que ambas se obtienen desde posiciones ligeramente distintas, es necesario expresarlas en una geometría común; este proceso se conoce como co-registración.

Una vez co-registradas, ambas imágenes comparten la geometría de la imagen master, lo que permite calcular la diferencia de fase entre ellas, denominada fase interferométrica ( $\psi_{int}$ ). Para ello, suponemos que la retrodispersión del terreno es la misma en ambas adquisiciones  $\varphi_{scattering1} \approx \varphi_{scattering}$ . Esta magnitud se expresa mediante la siguiente relación:

$$\psi_{int} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{4\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) \quad (2)$$

Esta fase interferométrica ( $\psi_{int}$ ) está formada por cuatro componentes principales: el desplazamiento del terreno, que constituye la componente de interés en la medición de deformaciones; los efectos atmosféricos ( $a$ ), que se deben a las variaciones en la propagación de la señal al atravesar las distintas capas de la atmósfera; la componente topográfica ( $t$ ), originada por las diferencias geométricas entre ambas adquisiciones; y el ruido ( $n$ ), que engloba todas las fuentes de error no modeladas. En conjunto, la fase interferométrica puede expresarse como la suma de estos cuatro términos:

$$\psi_{int} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + a + t + n \quad (3)$$

La interferometría diferencial convencional (DInSAR) se centra en aislar y calcular el término asociado al desplazamiento dentro de la ecuación (3). Esta técnica constituye una variante de la interferometría, diferenciándose principalmente en que se elimina la contribución topográfica mediante el uso de un modelo digital de elevación (MDE). Considerando un nivel de ruido bajo ( $n \approx 0$ ), la ecuación (3) puede simplificarse y expresarse de la siguiente manera:

$$\psi_{int} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + a + \varepsilon \quad (4)$$

Donde  $\varepsilon$  es la contribución a la fase por posibles errores en la sustracción del MDE.

La fase interferométrica de esta expresión se representa mediante interferogramas diferenciales, lo que permite detectar desplazamientos del terreno. No obstante, en la práctica, el nivel de ruido ( $n$ ) puede ser elevado y, sumado al error del modelo digital de elevación ( $\varepsilon$ ) y a los efectos atmosféricos ( $a$ ), dificulta la determinación precisa de los desplazamientos a partir de un par de imágenes. Para superar esta limitación, se desarrollaron técnicas DInSAR avanzadas o multitemporales, basadas en el análisis de series temporales de imágenes SAR. La combinación de estas imágenes permite generar un elevado número de interferogramas y, a partir de ellos, identificar puntos de retrodispersión constante a lo largo del tiempo, conocidos como reflectores persistentes o PS. Posteriormente, se calcula, con precisión milimétrica la velocidad media del desplazamiento y las series temporales de deformación en esos puntos “de alta calidad”.

La geometría de adquisición de las imágenes SAR es fundamental para interpretar correctamente la información obtenida. Las imágenes se capturan con un cierto ángulo respecto

a la vertical, lo que implica que los desplazamientos medidos corresponden a acortamientos o alargamientos a lo largo de la línea de vista (LOS) que une virtualmente el satélite con el objeto. Así, movimientos negativos indican que el reflector se aleja del satélite, mientras que movimientos positivos implican acercamiento. Además, los satélites SAR describen órbitas polares, lo que hace que las imágenes ascendentes (sur-norte) presenten una geometría diferente a las descendentes (norte-sur), impidiendo su combinación para generar interferogramas.

Desde los años 90, han operado más de una veintena de satélites, tanto comerciales como científicos, equipados con sensores SAR de distintas bandas electromagnéticas (X, C y L). Cada satélite presenta un tiempo de revisita que varía desde unas pocas horas, como la constelación CosmoSkyMed, hasta varias semanas (46 días) en el caso de ALOS-PALSAR. La banda utilizada también condiciona la penetración en la vegetación: la banda L ( $\lambda = 24$  cm) es la más adecuada en zonas vegetadas, mientras que la banda X ( $\lambda = 3,1$  cm) presenta problemas de decorrelación en presencia de vegetación. Tanto el tiempo de revisita como la capacidad de penetración en la vegetación influyen de manera significativa en la aplicación de la técnica DInSAR para el estudio de movimientos del terreno como deslizamientos o dolinas.

Para una información más detallada de la técnica, se recomienda la lectura de la publicación en castellano de Bru et al. (2024).

#### 5.4. European Ground Motion Service

El *European Ground Motion Service* (EGMS) es un servicio paneuropeo de monitorización de movimientos del terreno que forma parte del programa Copernicus. Utiliza técnicas avanzadas de interferometría radar por satélite (InSAR), con datos de la familia de satélites Sentinel-1, para medir desplazamientos del terreno con precisión milimétrica a lo largo del tiempo.

El EGMS proporciona mapas y series temporales homogéneas y comparables en todo el territorio europeo, permitiendo detectar procesos de deformación asociados a subsidencia del terreno, movimientos de ladera, deformaciones relacionadas con actividad tectónica o volcánica, y actividades humanas como extracción de agua, minería o infraestructuras, entre otros.

Toda la información generada está disponible en abierto, siendo gratuita y actualizada periódicamente, lo que convierte al EGMS en una herramienta clave para la gestión del territorio, la evaluación de riesgos geológicos y la planificación urbana y civil a escala continental.

EGMS proporciona tres niveles diferentes de datos (Costantini et al., 2021; Crosseto et al., 2021):

**(a) Basic data:** Datos originales de los satélites SAR referenciados a un punto de referencia local. Resolución típica de 25–100 m. Útiles para análisis preliminares o procesamiento propio.

**(b) Calibrated data:** Datos referenciados a un modelo derivado de series temporales de datos de sistemas globales de navegación por satélite (GNSS). Los productos calibrados son absolutos, por lo que ya no dependen de un punto de referencia local.

**(c) Ortho data:** Componentes del movimiento (horizontal y vertical) anclados a un modelo geodésico de referencia. Los productos Ortho se basan en el producto *Calibrated*, remuestreado a una cuadrícula (grid) de 100 m.

En el presente informe únicamente se hace uso de los datos “Calibrated”, que miden a lo largo de la línea de vista del satélite, y “Ortho”, que proporcionan los desplazamientos verticales y E-O obtenidos por descomposición trigonométrica a partir de los datos de geometría de

adquisición. Las principales características de estos conjuntos de datos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características principales de los datos del EGMS usados en este estudio (European Ground Motion Service, 2025).

Tipo de dato	Resolución (m)	Precisión de la geolocalización (m)	Desviación estándar de la velocidad media, $1\sigma$ (mm/año)	Desviación estándar media del desplazamiento, $1\sigma$ (mm)
Calibrated	Persistent scatterers 5x20 Distributed scatterers <100 m	<10	0.7 en puntos con coherencia mayor de 0.7	8
Ortho	100x100	<10	0.7	8

### 5.5. Umbrales de estabilidad InSAR

En InSAR, la condición de estabilidad del terreno se establece normalmente a partir de la desviación estándar de la medida ( $\sigma$ ). Este no es un valor teórico, sino una estimación empírica de la incertidumbre de la medida. Por lo tanto, para considerar una zona como estable tiene que cumplirse la siguiente condición:

$$|v| \leq k \cdot \sigma$$

Donde  $v$  es la velocidad media,  $\sigma$  es la desviación estándar de la velocidad (Tabla 1) y  $k$  es el factor umbral. En la práctica habitual, es muy común adoptar valores de entre 1 y 3 para el factor  $k$ .

Cuando se adoptan valores de  $k=1$  (i.e.,  $1\sigma$  como valor de estabilidad), el umbral resultante resulta muy sensible al ruido, identificando como activas zonas estables afectadas por artefactos atmosféricos y otras fuentes de ruido. El valor de  $k=2$  (i.e.,  $2\sigma$  como valor de estabilidad) es bastante común en el ámbito del InSAR, proporcionando cierto equilibrio entre los falsos positivos (puntos estables, pero clasificados como inestables por el umbral elegido) y la pérdida de información (puntos que son inestables, pero son clasificados como estables por el umbral establecido). El valor de  $k=3$  (i.e.,  $3\sigma$  como valor de estabilidad) resulta más conservador, detectando principalmente deformaciones claras y reduciendo los falsos positivos. El valor de  $k=4$  (i.e.,  $4\sigma$  como valor de estabilidad) resulta muy conservador, detectando deformaciones indudables y eliminando prácticamente todos los falsos positivos.

En este estudio, se ha elegido un umbral de estabilidad conservador de  $4\sigma$ , que según los valores de desviación estándar de la velocidad de los procesados EGMS (Tabla 1) correspondería a 2.8 mm/año, que redondeando por exceso sería de 3 mm/año. Es decir, exclusivamente a efectos de representación y de discusión, en el presente informe se considerarán como activos todos aquellos puntos que presenten velocidades de desplazamientos superiores a los 3 mm/año.

## 6. Metodología de trabajo

### 6.1. Datos InSAR

El procesamiento de los datos realizado en el presente estudio ha comenzado con la descarga de los datos InSAR de la página web de la *European Environment Agency*. Se han descargado los datos

*calibrated* y *ortho* correspondientes a los periodos 2015-2021 y 2019-2023, cuyas fechas detalladas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Periodos temporales de los procesados InSAR empleados en este informe. (\*) Los datos Calibrated cubren el periodo 2015-2021, mientras que los datos Ortho cubren el periodo 2016-2021.

Tipo de dato	Periodo	Órbita o componente	Periodo temporal cubierto por las imágenes
2016-2021*	Calibrated	Ascendente	05/03/2015 – 22/12/2021
		Descendente	15/02/2015 – 28/12/2021
	Ortho	Vertical	05/01/2016 – 22/12/2021
		Horizontal	05/01/2016 – 22/12/2021
2019-2023	Calibrated	Ascendente	01/01/2019 - 24/12/2023
		Descendente	02/01/2019 – 25/12/2023
	Ortho	Vertical	07/01/2019 - 24/12/2023
		Horizontal	07/01/2019 - 24/12/2023

Los datos decargados han sido representados mediante el Sistema de información Geográfica (SIG) libre QGIS para su visualización y análisis espacial. Asimismo, se han analizado las series temporales InSAR disponibles para evaluar la evolución del proceso de deformación estudiado.

## 6.2. Identificación y cartografía de grietas en el terreno y daños

La primera fase consistió en una inspección en campo de la zona de inestabilidad, previamente delimitada mediante el análisis de la interferometría radar (InSAR). Durante dicho reconocimiento se realizó una cartografía exhaustiva de las grietas con aspecto fresco visibles sobre el terreno o en pavimentos. También se cartografiaron grietas en edificaciones. Cabe aclarar que el estudio de daños no tiene como finalidad evaluar el estado de las edificaciones, sino acotar la distribución espacial de los daños estructurales, para, junto con las grietas en el terreno, delimitar un perímetro aproximado de afección de las deformaciones observadas. Es importante aclarar también que algunos de los daños señalados podrían tener su origen en otras causas ajenas al proceso estudiado, y que algunas edificaciones no identificadas podrían presentar también daños. Por consiguiente, su identificación y caracterización exhaustiva, el diagnóstico específico de las patologías, y la evaluación de daños, exceden el objeto de este informe.

Posteriormente, en la fase de gabinete, estas evidencias de deformación fueron digitalizadas en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Para garantizar la precisión en su localización, se utilizó como capa de base una ortofotografía de alta resolución y reciente adquisición del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). La posición de algunas grietas fue también definida mediante el apoyo de las panorámicas 360º de Google Street View. Además, las imágenes panorámicas de diferentes años de Google Street View han permitido extraer información temporal de la evolución de algunas grietas.

## 6.3. Toma de muestras de agua

El día 2 de diciembre de 2025 se llevó a cabo una toma de 5 muestras de agua utilizando muestreadores plásticos de líquidos de 100 ml. Todas las muestras se recogieron en manantiales naturales y fueron georreferenciadas para su posterior análisis. Los puntos de muestreo se situaron en el entorno del núcleo urbano de Monóvar (Figura 4).

Las muestras fueron posteriormente transportadas a los Servicios Técnicos de Investigación de la Universidad de Alicante para su análisis. En primer lugar, las muestras se filtraron y se



diluyeron con agua destilada hasta que su conductividad fue inferior a 1 mS/cm. En segundo lugar, las concentraciones iónicas se midieron mediante un cromatógrafo iónico de doble canal con supresión química y detección conductimétrica y UV-VIS (Metrohm 850 ProFI C AnCat-MCS), equipado con un reactor de derivatización post-columna.

La conductividad y el pH también fueron medidos en laboratorio mediante un conductímetro modelo Hach Lange senION+Portable Meter.

Finalmente, el contenido en  $\text{HCO}_3^-$  fue determinado en el laboratorio de hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil mediante una titulación volumétrica con un ácido fuerte.

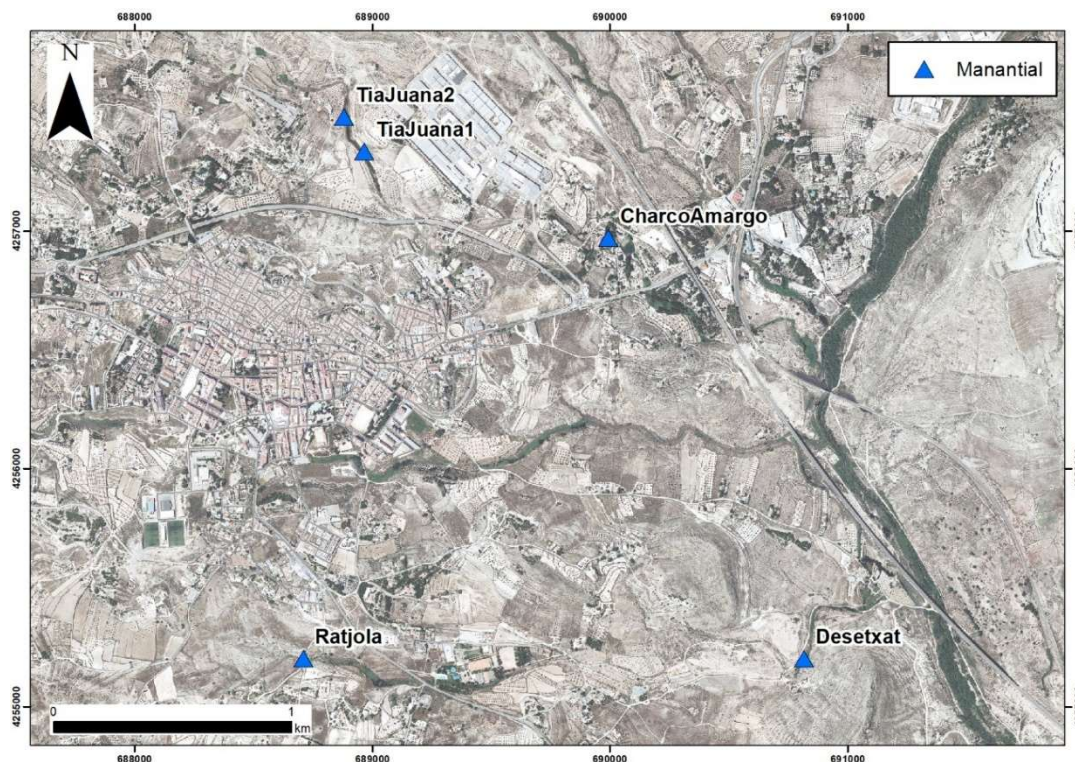


Figura 4. Localización de los puntos de toma de muestras de agua para su posterior análisis.

## 7. Resultados

### 7.1. Cartografía de deformación

#### 7.1.1. Periodo 2016-2021

Los mapas de la Figura 5 muestran los resultados de la velocidad de desplazamiento (mm/año) en la línea de vista (LOS) del satélite obtenidos mediante Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) para el municipio de Monóvar durante el periodo 2015-2021. Las figuras recogen las velocidades medidas para las órbitas ascendente y descendente, empleando una escala de color en la que los tonos cálidos (amarillos y rojos) representan un alejamiento del satélite (subsistencia), mientras que los tonos verdes indican estabilidad (rango correspondiente a  $4\sigma$ , de  $-3$  a  $3$  mm/año) y los azules movimiento relativo hacia el satélite. Ambas órbitas revelan de forma coherente una zona afectada por subsidencia activa localizada en el sector noreste del núcleo urbano de Monóvar, en las inmediaciones de la CV-83. Esta zona se manifiesta como una agrupación bien definida de puntos con velocidades de alejamiento (subsistencia) respecto al satélite que son significativas, alcanzando valores máximos inferiores a  $-45.0$  mm/año. La morfología de la deformación es elíptica, con el eje mayor orientado en dirección NO-SE. El resto



del área urbana, especialmente hacia el oeste, se mantiene en condiciones de estabilidad, sin registrarse desplazamientos significativos fuera del sector mencionado.

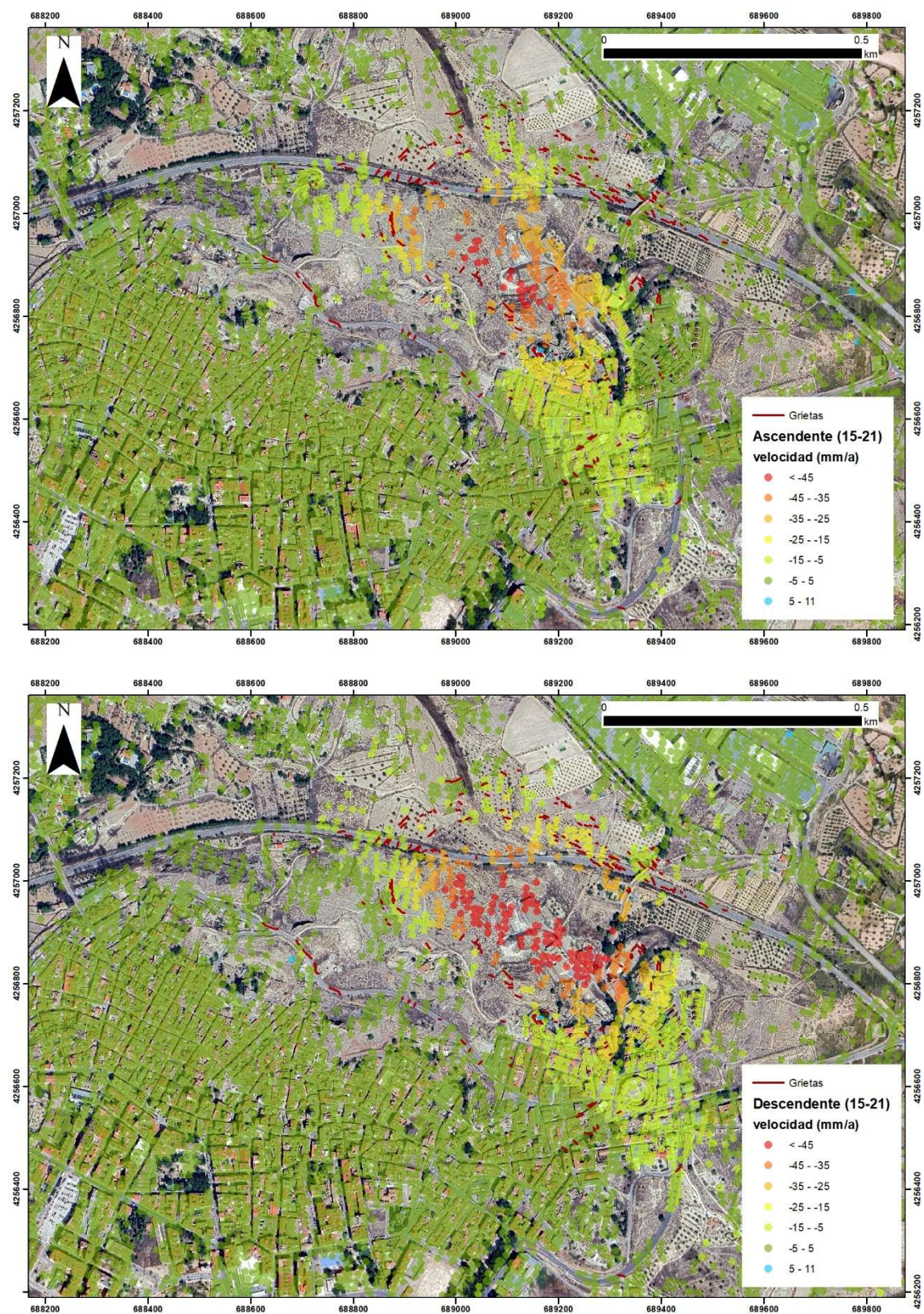


Figura 5. Datos de velocidad de desplazamiento a lo largo de la línea de vista (LOS) medidos a partir de órbitas ascendentes y descendente del periodo 2015-2021.



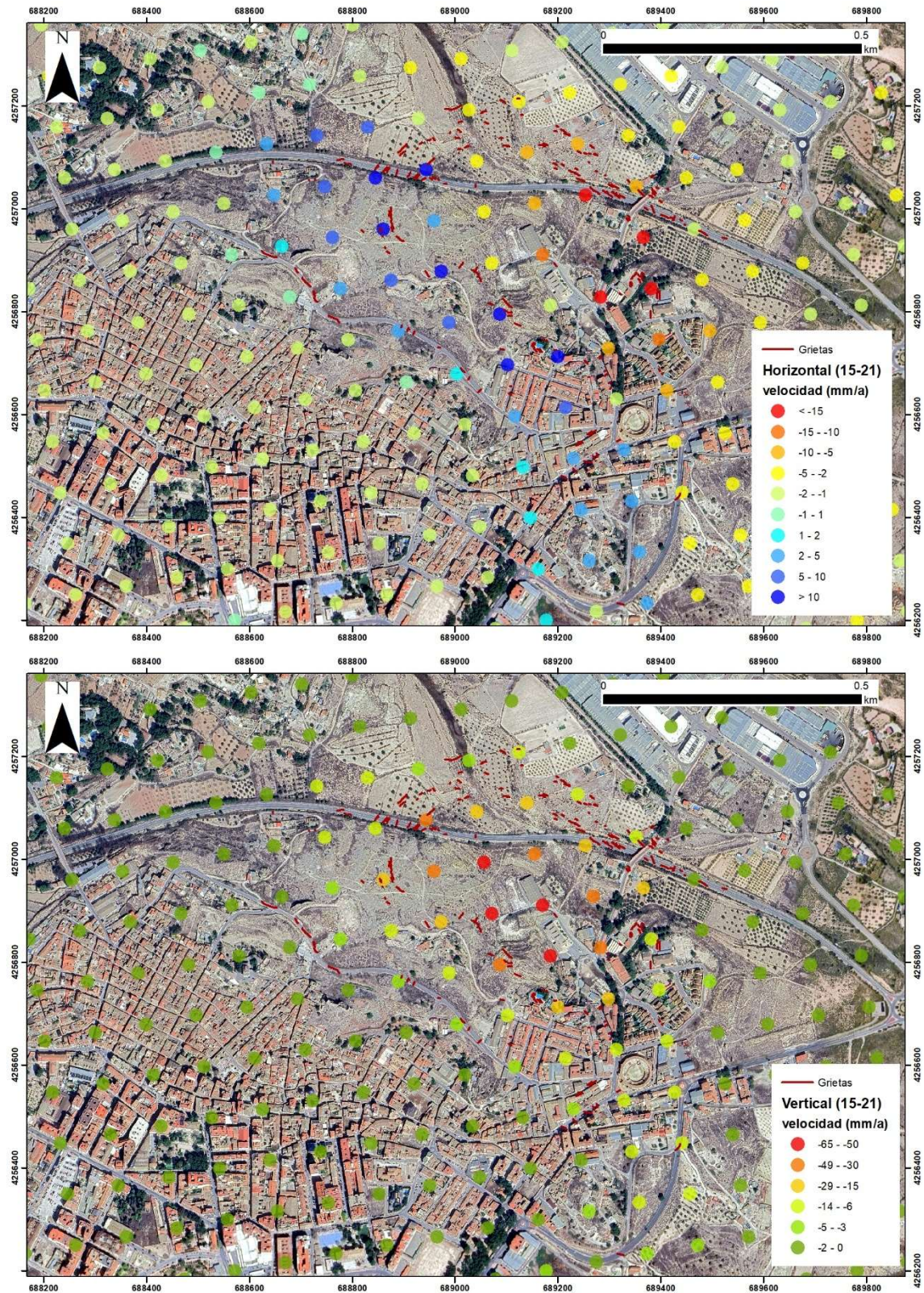


Figura 6. Datos de velocidad de desplazamiento horizontal (E-O) y vertical obtenidos a partir de la descomposición geométrica de los desplazamientos LOS del periodo 2016-2021.

El análisis de la componente vertical para este periodo (2016-2019) confirma la presencia de una cubeta de subsidencia bien delimitada en el noreste del núcleo urbano de Monóvar (Figura 6).



El centro de esta cubeta registra velocidades de hundimiento vertical máximas de  $-63$  mm/año. Por su parte, la componente horizontal este-oeste de la velocidad muestra un patrón de deformación lateral convergente hacia el punto de máxima subsidencia, situado en el entorno del tanatorio. Se observa que el terreno situado al este del epicentro de hundimiento se desplaza hacia el oeste, mientras que el sector occidental se desplaza hacia el este, con magnitudes de hasta  $\pm 15$  mm/año. Cabe recordar que la técnica InSAR no permite medir desplazamientos N-S por la geometría de adquisición, por lo que únicamente se ha podido determinar la componente E-O de desplazamiento, y por tanto las tasas de desplazamiento horizontal obtenidas deben ser consideradas como estimaciones mínimas de los valores netos reales.

#### **7.1.2. Periodo 2019-2023**

Los dos mapas adjuntos presentan los resultados de la velocidad de desplazamiento (mm/año) en la línea de vista (LOS) del satélite obtenidos mediante la técnica de Interferencia de Radar de Apertura Sintética (InSAR) para la población de Monóvar. Las figuras muestran las velocidades medidas para las órbitas descendentes y ascendentes (Figura 7), ambas cubriendo el periodo 2019-2023, y siguiendo la convención de colores donde los tonos fríos (azul) indican un movimiento de acercamiento al satélite, mientras que los tonos cálidos (amarillo/naranja/rojo) indican un movimiento de alejamiento al satélite.

Ambos mapas revelan una marcada zona de subsidencia concentrada en la parte noreste del área urbana, visible como una agrupación de puntos de colores cálidos. Esta zona con deformación activa se extiende aproximadamente coincidiendo con un área de transición entre la zona residencial densa y la CV-83. La morfología de la zona de máxima subsidencia es típicamente elíptica con una clara orientación de sus ejes mayor y menor en las direcciones NO-SE y NE-SO, respectivamente. Los valores máximos de velocidad de subsidencia (alejamiento del satélite) se registran en el centro de esta zona, superando el umbral de  $<-45$  mm/año tanto en la órbita ascendente como en la descendente. Por el contrario, la gran mayoría del área urbana presenta una estabilidad significativa, con velocidades en el rango de  $-3$  a  $3$  mm/año (rango correspondiente a  $4\sigma$ , ver sección 5.5). La superposición de las grietas cartografiadas (líneas negras) muestra una estrecha correlación espacial con el área afectada por tasas de subsidencia más altas. La coherencia espacial y magnitud del desplazamiento entre las órbitas ascendente y descendente sugiere un componente de movimiento vertical dominante.

Las componentes vertical y horizontal (E-O) para el periodo 2019-2023 confirma la naturaleza y la extensión de la deformación del terreno en Monóvar. El análisis de la componente vertical revela una cubeta de subsidencia bien definida localizada en el sector noreste del núcleo urbano. Las velocidades verticales máximas de subsidencia superan los  $<-50$  mm/año (movimiento descendente) en el centro de esta cubeta, mientras que el resto de la ciudad, particularmente las áreas residenciales, muestra una estabilidad general con movimientos mínimos de  $-3$  a  $3$  mm/año dentro del umbral de estabilidad de cuatro veces la desviación estándar de la velocidad ( $4\sigma$ ) definido en la sección 5.5. La correlación espacial de esta subsidencia con las grietas cartografiadas sugiere una relación directa entre el hundimiento de la superficie del terreno y las manifestaciones de tracción en los bordes de la zona deformada.

Por otro lado, la componente horizontal de la velocidad de desplazamiento muestra un patrón de deformación lateral asociado al hundimiento vertical. Aunque las magnitudes de la velocidad horizontal son mucho menores que las verticales (máximos alrededor de  $\pm 15$  mm/año), el patrón que se observa muestra claramente una convergencia horizontal del terreno hacia el centro del núcleo de máxima subsidencia. Más concretamente, en los flancos de la cubeta de



hundimiento se registran movimientos horizontales centrípetos hacia el área de máxima subsidencia.

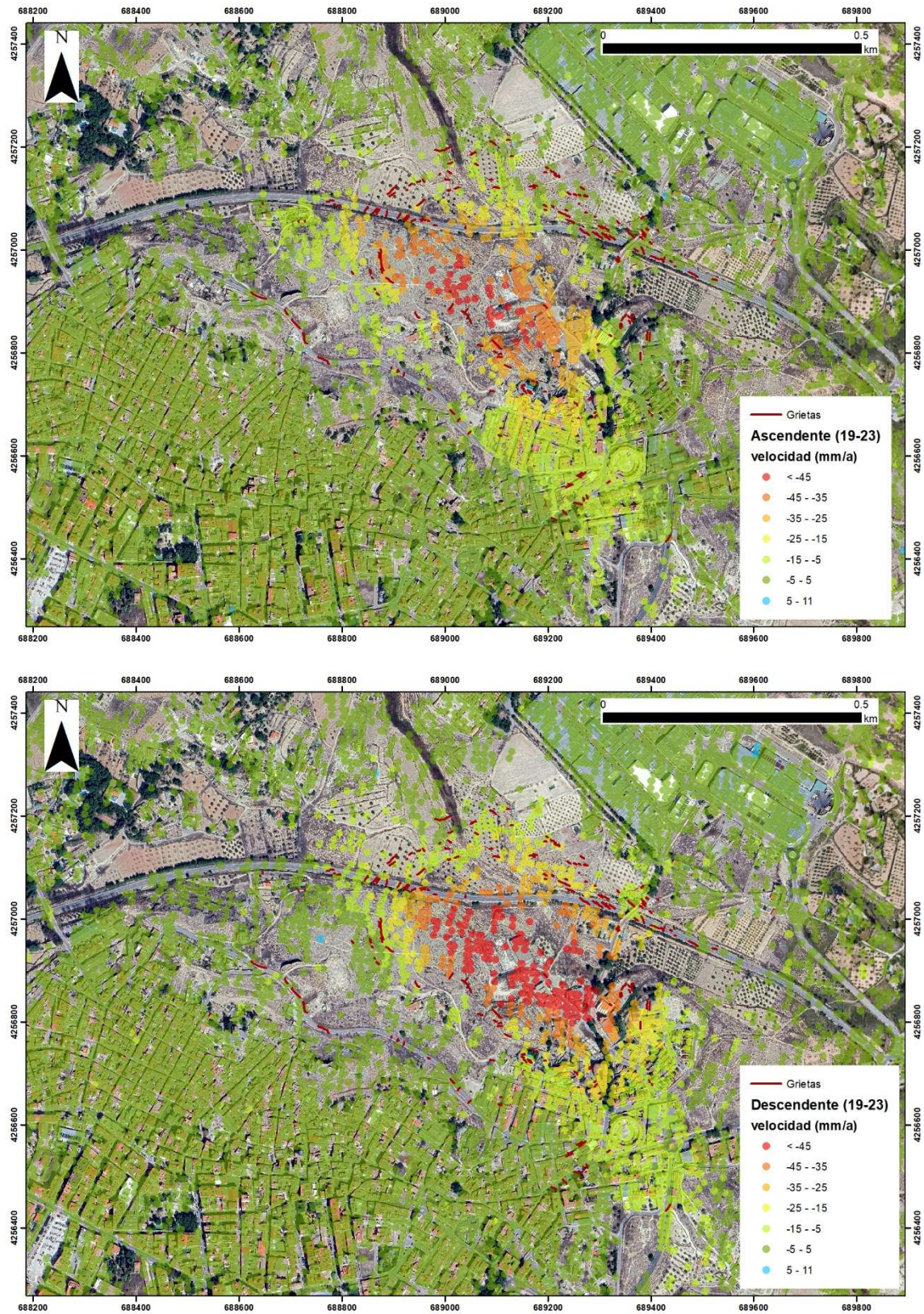


Figura 7. Datos de velocidad de desplazamiento a lo largo de la línea de vista (LOS) medidos a partir de órbitas ascendentes y descendente del periodo 2019-2023.



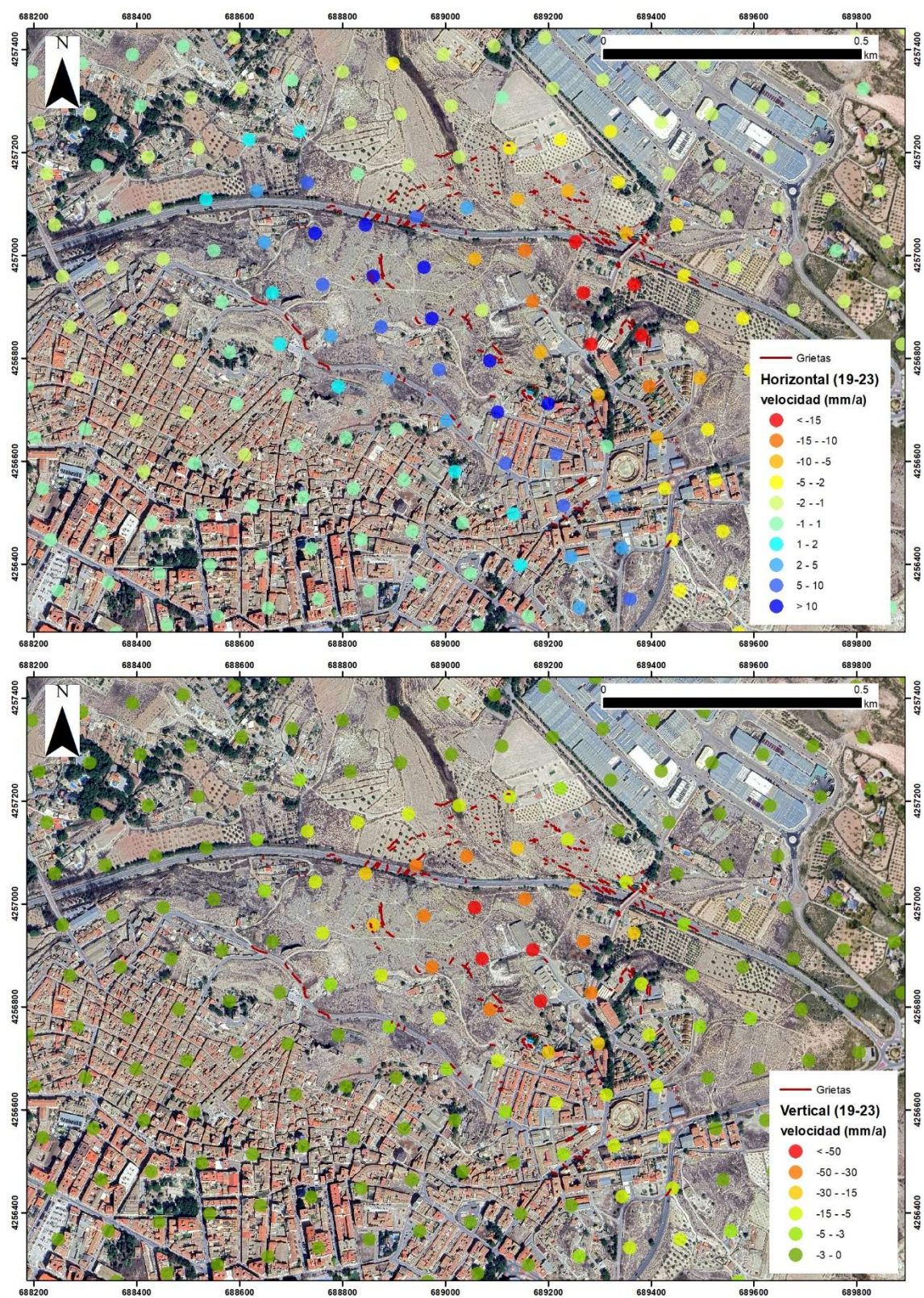


Figura 8. Datos de velocidad de desplazamiento horizontal (E-O) y vertical obtenidos a partir de la descomposición geométrica de los desplazamientos LOS del periodo 2019-2023.



Cabe indicar que los desplazamientos descritos anteriormente parecen tener cierta continuidad hacia el sur a través de la zona de El Raval y hasta Cantaranes, más concretamente, hasta el camino del Collado de Novelda, próximo a las instalaciones deportivas, con desplazamientos verticales medidos en el periodo 2019-2023 siempre inferiores a 10 mm/año (Figura 9). La zona sur de desplazamientos está esencialmente constituida por zonas agrícolas tanto activas como abandonadas con algunas construcciones diseminadas. Además, no queda claro si se trata de una segunda área de hundimiento. No obstante, esta zona queda fuera del objeto principal de este estudio.

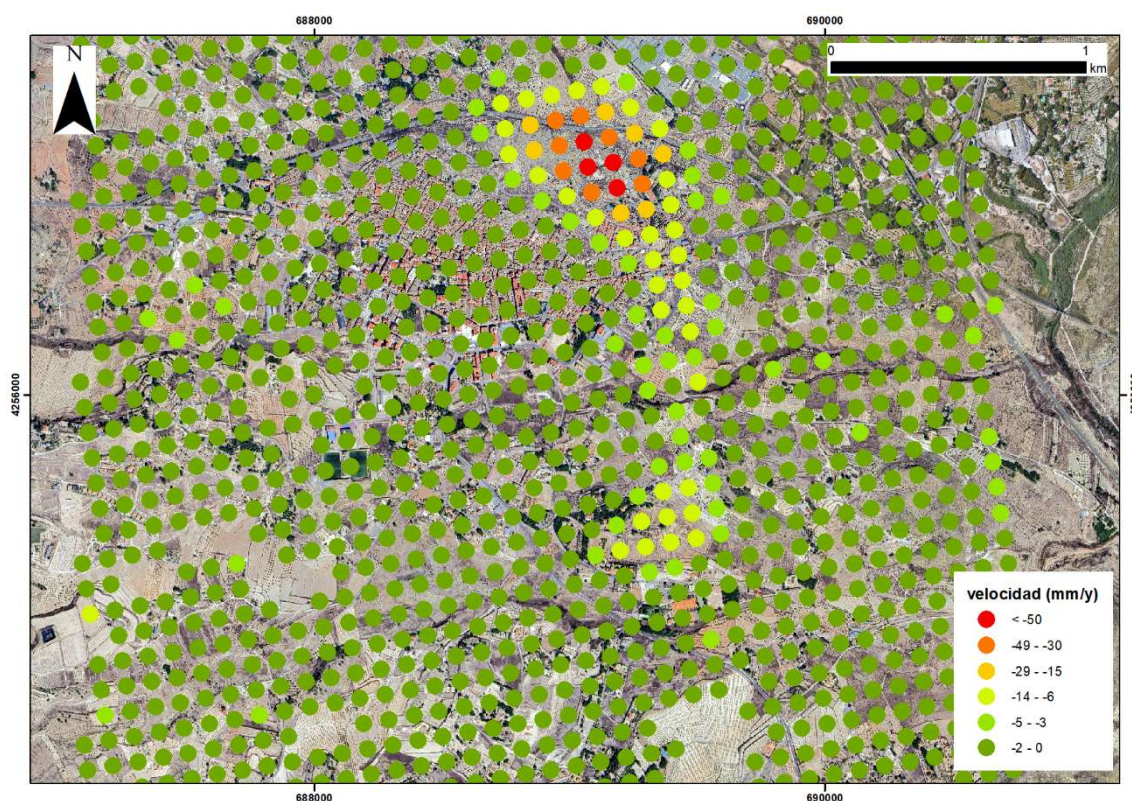


Figura 9. Mapa de desplazamientos verticales durante el periodo 2019-2023 de todo el casco urbano de Monóvar en el que se observa como los desplazamientos de la zona estudiada se extiende hacia el sur con menor intensidad.

La representación de las tasas medias de subsidencia vertical en dos secciones transversales ortogonales (Perfiles A-A', B-B') que atraviesan la zona de máxima deformación confirma la presencia de una amplia **cubeta de subsidencia con un patrón de deformación esencialmente simétrico**, coherente con la distribución concéntrica de los mapas de velocidad vertical. Ambos perfiles muestran una morfología de cubeta de subsidencia, donde la velocidad de desplazamiento vertical se incrementa gradualmente desde los límites de la zona estable hasta alcanzar su máxima magnitud en el centro de la cubeta. Los extremos de las secciones transversales indican una estabilidad relativa, con velocidades máximas de  $-5$  mm/año. En el núcleo de la cubeta se registran velocidades de subsidencia altas, superiores a los  $-60$  mm/año. También se observa que las tasas en los dos periodos estudiados son muy similares, con diferencias máximas de  $4.89$  mm/año, siendo las velocidades ligeramente superiores para el periodo 2019—2023.

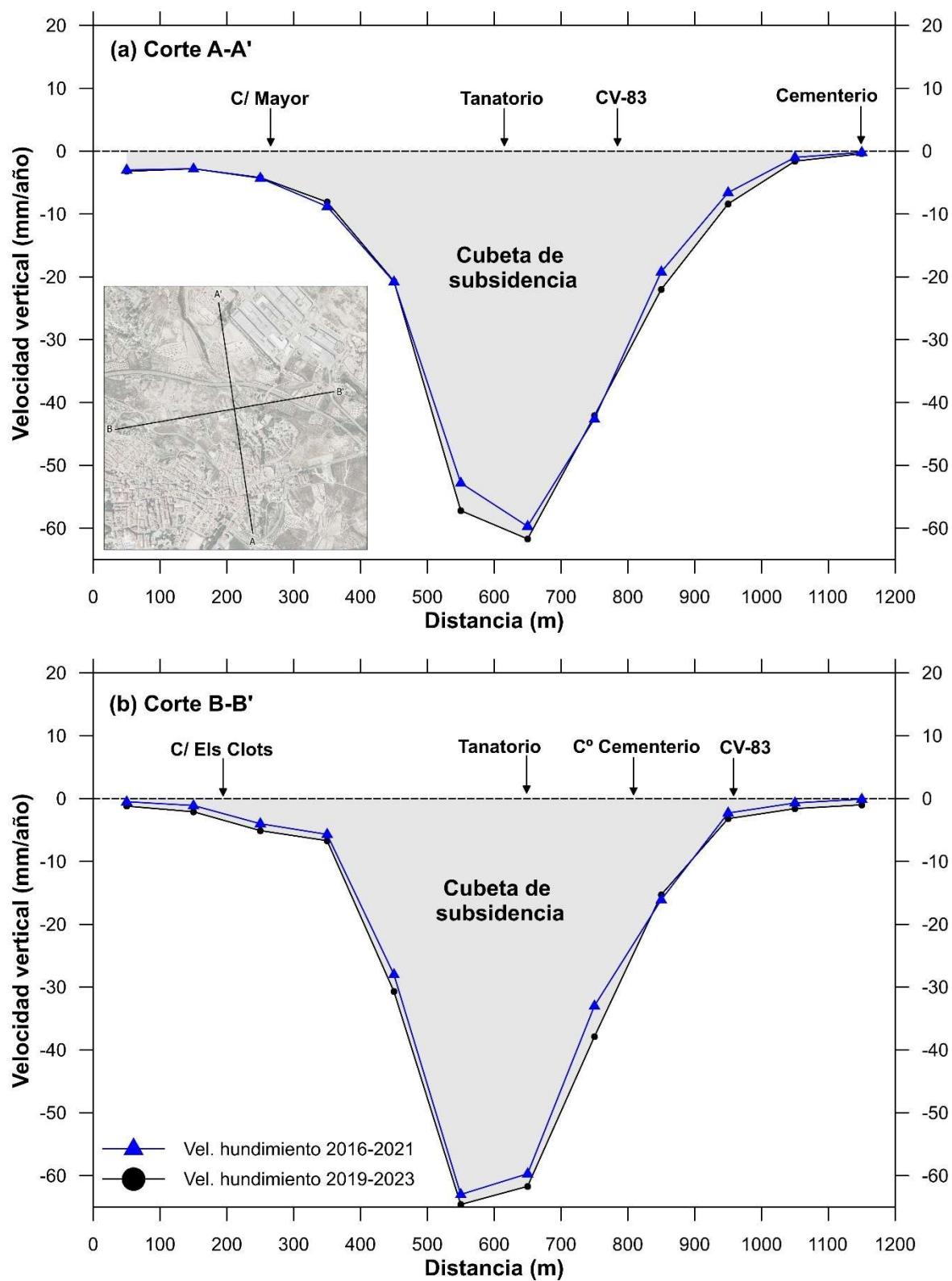


Figura 10. Secciones transversales de las velocidades verticales de desplazamiento medidos a través de la cubeta de asiento para los periodos 2016-2021 (azul) y 2019-2023 (negro): (a) sección A-A'; (b) Sección B-B'.



## 7.2. Series temporales InSAR

La evolución de los desplazamientos verticales a lo largo del tiempo en la zona de estudio muestra una tendencia muy lineal con pendientes que alcanzan los 64.6 mm/año en la zona oeste del Tanatorio. Para ilustrar la tendencia y la magnitud de los desplazamientos verticales en la zona de estudio se han seleccionado una serie de puntos específicos cuya localización se muestra en la Figura 11a y su serie temporal en la Figura 11b. Los puntos InSAR elegidos, de resolución 100x100 m, se localizan a distancia creciente de la zona de máxima subsidencia descrita.

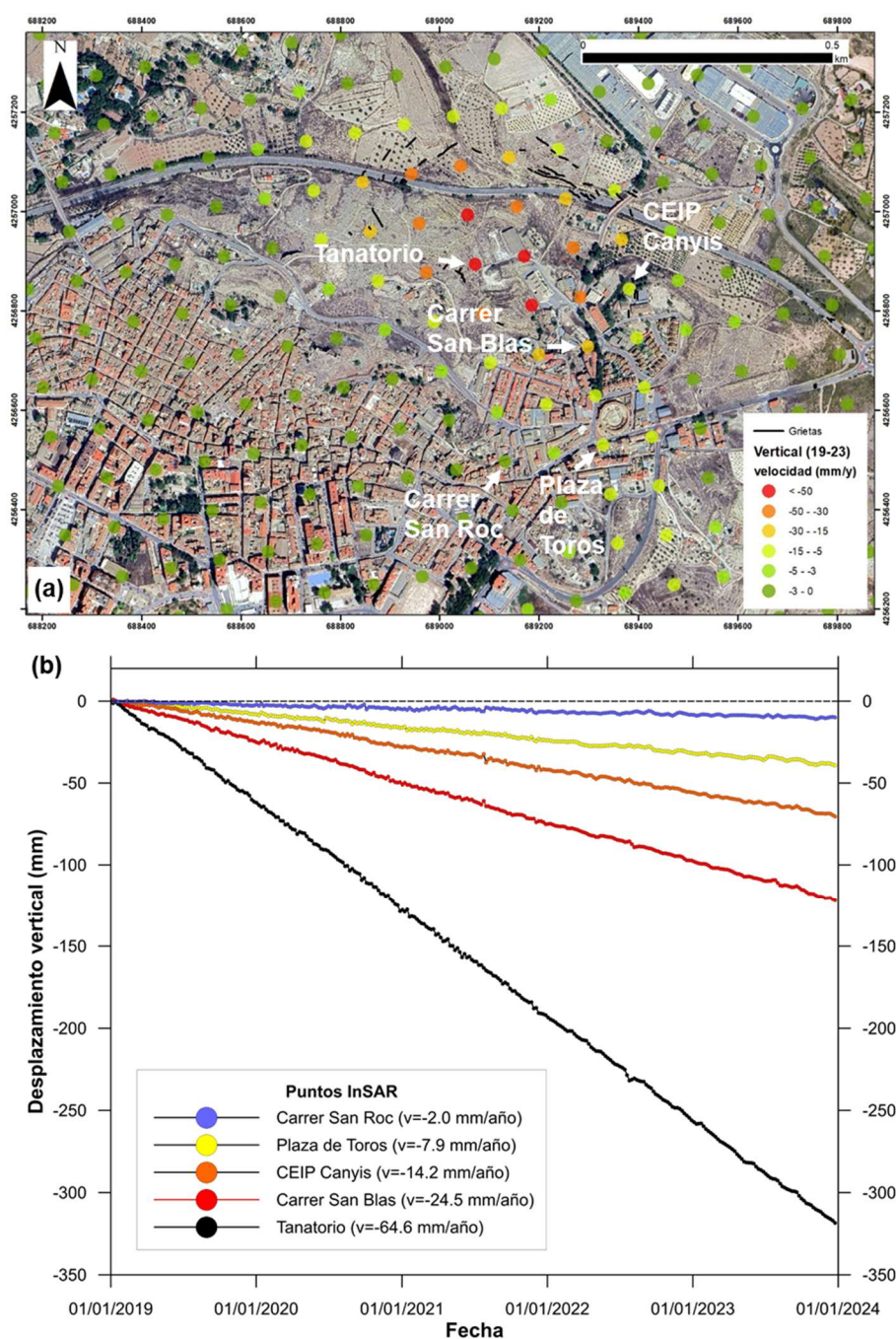


Figura 11. Series temporales de desplazamiento vertical de varios puntos representativos de la zona de estudio: (a) Localización de los puntos seleccionados; (b) Evolución temporal de los desplazamientos verticales (periodo 2019-2023).  $v$  representa la velocidad media del desplazamiento en mm por año.

El aspecto más significativo a destacar es el **asiento continuo de la superficie del terreno** con tasas constantes, sin presentar **ningún tipo de estacionalidad** o variabilidad temporal que pudiera indicar su relación con otros factores externos, así como la **inexistencia de desaceleración alguna** de los desplazamientos que indique una posible atenuación o estabilización.

### 7.3. Grietas en el terreno y estructuras de flexión superficial

Se han **cartografiado un total de 193 fisuras en el terreno** (Figura 12 y Figura 13). Estas fisuras presentan **aperturas variables de hasta 0.5 m** dependiendo de la localización. Algunas de estas fisuras se desarrollan también sobre la superficie de elementos constructivos como pavimentos, muros o edificaciones (Figura 14). En general, las grietas situadas al norte de la carretera CV-83 se desarrollan en depósitos aluviales cuaternarios, formando bandas de deformación más anchas y mostrando mayores anchuras. En cambio, las grietas situadas al sur de la carretera y el barranco afectan mayoritariamente al sustrato triásico predominantemente yesífero. La mayor dispersión y anchura de las grietas en los depósitos aluviales es atribuible a su menor resistencia mecánica y a la actuación de procesos de erosión (escorrentía, desprendimientos) que causan su ensanchamiento con relativa celeridad. Algunas de las grietas identificadas presentan un pequeño salto relativo vertical con hundimiento hacia el interior de la cubeta de subsidencia (grieta-escarpe). Estas componentes locales de deformación vertical y horizontal son consecuencia de una subsidencia a gran escala de flexión que provoca esfuerzos de tracción en la zona perimetral relacionados con el desplazamiento horizontal del terreno hacia la zona de máximo hundimiento.

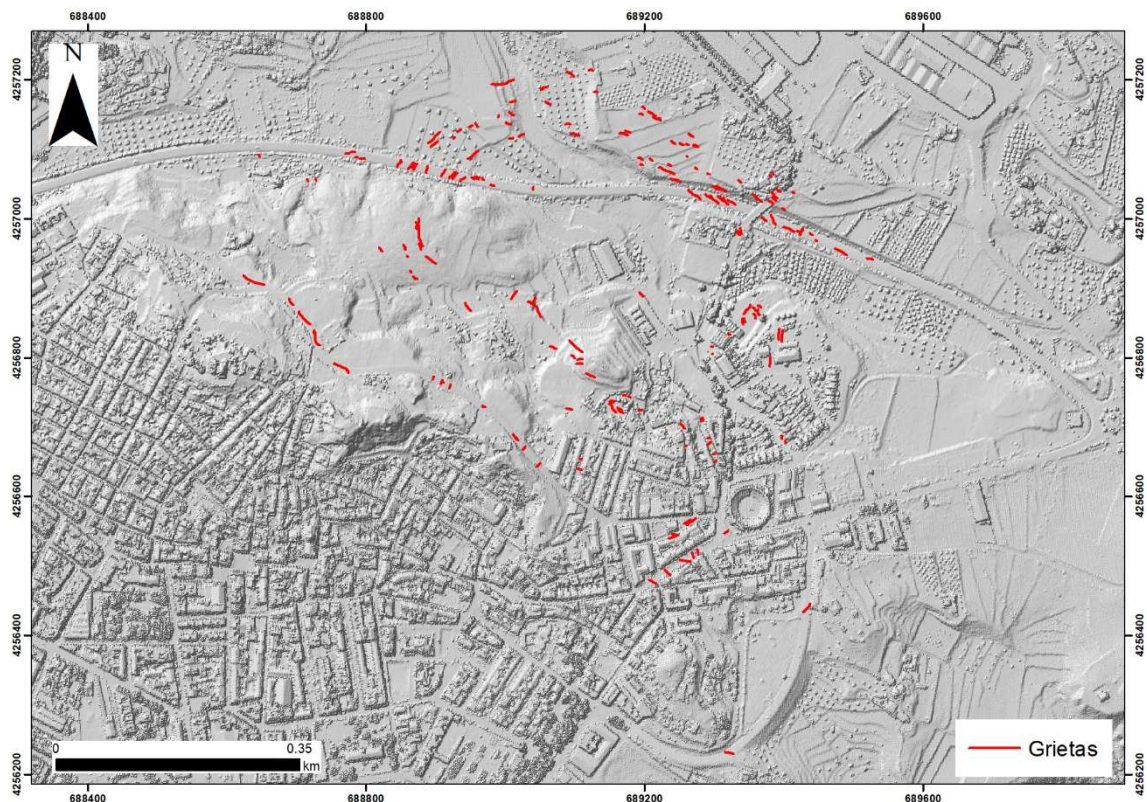


Figura 12. Distribución de grietas en el terreno dispuestas de forma concéntrica a la zona deformada.



La **persistencia o continuidad de las fisuras es elevada**, aunque su apertura en superficie es limitada. En algunos casos, las grietas se manifiestan como alineaciones de pequeños agujeros de orden decimétrico, que corresponden a puntos donde la capa de suelo más superficial ha colapsado hacia la grieta subyacente. Estos pequeños agujeros van progresivamente coalesciendo por alargamiento y formación de nuevos colapsos, hasta formar grietas continuas que actúan como sumideros de la escorrentía superficial y focos de erosión hídrica preferente. Como dato anecdótico, los conejos aprovechan estas irregularidades para excavar sus cados y gazaperas. Además, en las zonas agrícolas, las grietas se tapan regularmente tras las actividades de labranza. Esto hace que las grietas se observen en superficie como tramos discontinuos pero alineados entre sí.

En cuanto a la profundidad de las grietas, solamente se ha podido medir en grietas muy abiertas, por lo que resulta indeterminada. Los valores medidos en las grietas de mayor **apertura** de la zona norte presentaban valores **de hasta 1.98 m**. No obstante, cabe destacar la limitación existente a la hora de medir dicha profundidad por la reducción de su apertura con la profundidad y el relleno de las mismas, aunque la profundidad de las grietas parece ser superior a la estrictamente medida.



Figura 13. Grietas en el terreno: a) Grieta de orientación aproximada N-S y de reducida apertura situada en la zona de Els Clots. b) Grieta incipiente de escasa persistencia y apertura (Els Clots). c) Grieta situada en un banal de olivos junto a la CV-83 parcialmente cubierta de vegetación. d) Grieta de grandes dimensiones parcialmente erosionada situada en un banal de olivos situado junto a la CV-83. e) Prolongación hacia el norte o de la grieta mostrada en figura d). f) Grieta de gran persistencia, apertura y profundidad desarrollada en un depósito de terraza cementado junto a la CV-83.





Figura 14. Grietas afectando a elementos constructivos: a) Grietas en firme y muro con elevada continuidad de la calle San Blas. b) Grietas (flechas rojas) en muro y fachada de vivienda, y levantamiento del pavimento de la acera por esfuerzos de compresión en la calle Raval Cuartel. Obsérvese también la deformación de las placas del zócalo de la vivienda. c) Aspecto de las grietas de la calle San Blas mostradas en la figura a) en el otro lado de la calle, con continuidad en la acera y el edificio. d) Grieta en el pavimento de la Calle Mayor a lo largo de la cual existen numerosas grietas adicionales paralelas y de orientación similar.





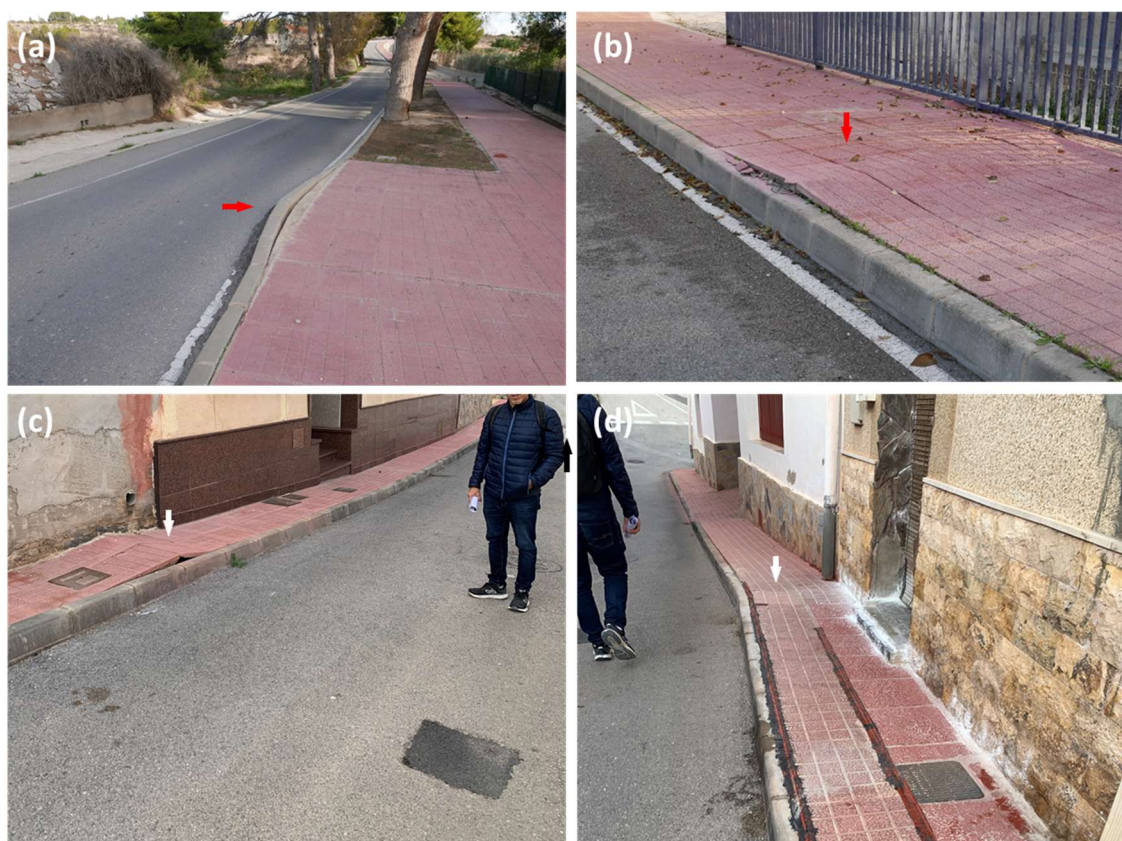
Figura 15. Grietas activas en la CV-835 identificadas en las imágenes históricas de Google Street View. a) Grietas reparadas el tramo comprendido entre la Calle Mayor y el Raval de Sant Pere en octubre de 2022. En Google se identifican grietas en este sector desde, al menos, 2009. b) y c) Patrones de grietas en la curva de a CV-835 a la altura del Arrabal Ronda Forca. La grieta aparece en 2013 y 2022. Actualmente, se ha vuelto a desarrollar con un patrón similar al de 2013.

Un aspecto muy relevante es la disposición espacial de las grietas en la zona NE. Estas se organizan de forma **claramente concéntrica al área de máxima deformación vertical definiendo aproximadamente una elipse** de eje mayor NO-SE y menor NE-SO.

En cuanto a la **edad de las grietas**, el análisis de imágenes de Google Street View ha permitido constatar que las principales fisuras observadas en la CV-83 resultan **visibles por primera vez en las imágenes de julio de 2013**, no siendo reconocibles en las imágenes de febrero y noviembre de 2009. No obstante, en las imágenes de 2009 parece identificarse un reasfaltado reciente de la vía.

En el área de desplazamientos que se extiende hacia el sur, a través de El Raval y hasta Cantaranes, tan solo se han identificado algunas grietas en el terreno de pequeño tamaño y sin continuidad que parecen estar relacionadas con procesos de desecación. Únicamente se han detectado algunas grietas en el firme de la carretera CV-835 (Figura 15) cuyo origen parece remontarse, como mínimo al año 2009, habiendo reaparecido tras el reasfaltado de la carretera y siendo visibles en la actualidad.

Por último, se han reconocido en el campo diversas estructuras de flexión superficial que han provocado el levantamiento o abombamiento de elementos constructivos (Figura 16). Específicamente, se ha identificado una deformación por compresión en el pavimento de la acera y el desplazamiento lateral de un bordillo en el Camino del Cementerio, en las inmediaciones de la comisaría de la Policía Local de Monóvar. También se ha identificado estructuras similares en el extremo oeste de la calle Raval Cuartel.



*Figura 16. Estructuras de flexión por compresión identificadas en el Camino del Cementerio, en las inmediaciones de la comisaría de la Policía Local de Monóvar y en el extremo oeste de la calle Raval Cuartel.*



#### 7.4. Análisis de agua

Las muestras de agua analizadas presentan conductividades eléctricas variables entre moderadas y elevadas (Tabla 3), con valores comprendidos entre 4.34 y 14.14 mS/cm, lo que indica un **grado significativo de mineralización**. Las muestras Tía Juana 1 y Tía Juana 2, tomadas en la Rambla del Charco, muestran las conductividades más altas (9.73 y 14.14 mS/cm, respectivamente), indicando una mayor concentración de sales disueltas. Por el contrario, Ratjola y Desetxat registran los valores más bajos de conductividad (4.34 y 5.01 mS/cm), indicando una menor mineralización. La muestra Charco Amargo presenta un valor intermedio (6.85 mS/cm). En España, la normativa de agua de consumo humano exige que la conductividad eléctrica sea menor de 2.5 mS/cm para considerar el agua apta para consumo sanitario. Para aguas de riego, criterios agronómicos suelen admitir niveles de salinidad máximos de 0.7–3.0 mS/cm como orientativos de riesgo salino según el cultivo. Por lo tanto, las muestras analizadas presentan una conductividad superior a la establecida para cultivos y consumo humano. En cuanto al pH, todas las muestras se sitúan en un rango neutro a ligeramente alcalino (7.12–7.58).

Tabla 3. Valores de conductividad y pH medidos en las muestras de agua tomadas en la zona de estudio.

Muestra	Conductividad (mS/cm)	pH
Tía Juana 1	9.73	7.20
Tía Juana 2	14.14	7.21
Charco Amargo	6.85	7.12
Ratjola	4.34	7.32
Desetxat	5.01	7.58

Los análisis químicos de todos los manantiales muestreados, todos ellos en zonas con sustrato evaporítico triásico, pertenecen a la facies hidroquímica clorurado sódica (Tabla 4). Las aguas contienen concentraciones relativamente altas de  $\text{Na}^+$  (1550-550 ppm),  $\text{Ca}^{2+}$  (605-403 ppm),  $\text{Cl}^-$  (2359-1004 ppm), y  $\text{SO}_4^{2-}$  (5629-1450 ppm). La relación molar Na/Cl es de 1 (Tía Juana 1 y 2, Charco Amargo) o próxima a 1 (Ratjola, Desetxat), indicando que dichos iones proceden de la disolución de halita ( $\text{NaCl}$ ). La relación molar Ca/ $\text{SO}_4$  es más variable, y en todos los casos significativamente inferior a 1 (0,24-0,67). Este rasgo es atribuible a la precipitación de carbonatos favorecida por el efecto del ion común, relacionado con el aumento de la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  por la disolución de cantidades significativas de yeso. El contenido iónico muestra claramente que las aguas muestreadas han interactuado con el Keuper evaporítico, circulando por zonas en las que la halita no se encontraba totalmente disuelto. Suponiendo que la totalidad del cloruro procede de la disolución de halita, podemos estimar que cada litro de agua ha disuelto 3.89 g, 6.14 g, 2.24 g, 1.65 g, y 1.68 g en Tía Juana 1 y 2, Charco Amargo, Ratjola y Desetxat, respectivamente. La cantidad de yeso disuelto por litro de agua, si suponemos que la totalidad del sulfato procede de la disolución de dicho mineral, sería de 7.07 g, 9.74 g, 5.57 g, 2.51 g y 3.55 g, respectivamente. Esto implicaría que, si suponemos que el caudal de agua de las surgencias fuera de 1 l/min, valor que de por sí es inferior al observado en Charco Amargo, cada año se estarían extrayendo del sistema entre 1606 t y 5976 t de sal y 574 t y 2226 t de yeso entre las cuatro surgencias analizadas, lo que equivaldría a volúmenes<sup>1</sup> de sal de entre 1606 y 5976 m<sup>3</sup> y de yeso de entre 2294 y 8903 m<sup>3</sup>. Las mayores concentraciones han sido registradas en la zona de manantial del Barranco del Charco (Tía Juana 2) situada a unos 300 m al norte de la cubeta de subsidencia, a pesar de que las aguas que descargan procedentes del sustrato

<sup>1</sup> Para los cálculos del volumen se ha considerado una densidad de 2.16 t/m<sup>3</sup> para la halita y de 2.30 t/m<sup>3</sup> para el yeso.



evaporítico deben experimentar un proceso de dilución al mezclarse con aguas aluviales. En esta zona el fondo del valle presenta abundantes plantas halófitas como *Suaeda sp.*

Las concentraciones de nitratos, que es un indicador clave de la posible contaminación del agua, están en todos los casos por debajo de 50 mg/l que es el valor máximo permitido en aguas potables por la Unión Europea, descartándose la existencia de contaminantes antrópicos.

Por otro lado, siguiendo la metodología de Alcalá y Custodio (2008), se han calculado las relaciones molares  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  de las muestras analizadas. Estas están comprendidas entre 903.43 y 1312.06. Al representar estos valores frente a la concentración de cloruros (1004,67-3735,05 mg/L), observamos que todas las muestras se sitúan sistemáticamente por encima del valor marino (relación molar  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  de 655) y algunas de ellas (i.e., Tía Juana 1, Tía Juana 2 y Charco Amargo) presentan valores superiores a 1200, observados en aguas que han interactuado con formaciones evaporíticas con sulfatos y halita (Alcalá y Custodio, 2008).

Tabla 4. Resultados de la concentración de aniones y cationes obtenidos en el análisis de las muestras de agua mediante cromatografía iónica.

Muestra	Concentración (ppm y moles/l*)									
	$\text{HCO}_3^-$	$\text{F}^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{Cl}^{*-}$	$\text{NO}_2^-$	$\text{Br}^-$	$\text{ClO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{SO}_4^{2-*}$
Tía Juana 1	504,3	2,377	2359,469	0,066	0,020	4,053	0,000	20,155	4088,423	0,042
Tía Juana 2	813,4	3,344	3735,051	0,105	0,028	6,541	0,000	1,501	5629,886	0,058
Charco Amargo	349,8	2,050	1359,593	0,038	0,015	3,033	0,000	33,387	3217,445	0,033
Ratjola	260,3	1,924	1004,675	0,028	0,040	2,437	0,000	29,715	1450,823	0,015
Desetxat	272,5	1,953	1027,371	0,029	0,012	2,563	0,714	32,062	2054,103	0,021
Muestra	Concentración (ppm y moles/l*)									
	$\text{Li}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Na}^{**}$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+*}$	$\text{Na/Cl}$	$\text{Ca/SO}_4$	
Tía Juana 1	0,464	1552,144	0,067	48,719	695,626	605,897	0,015	1,01	0,36	
Tía Juana 2	0,747	2491,594	0,108	75,271	1109,575	584,228	0,014	1,03	0,24	
Charco Amargo	0,328	937,840	0,041	43,839	491,088	577,280	0,014	1,08	0,42	
Ratjola	0,130	550,550	0,024	13,453	210,822	403,525	0,010	0,86	0,67	
Desetxat	0,184	619,278	0,027	20,635	269,891	523,458	0,013	0,93	0,62	

Por último, cabe destacar las altas concentraciones de  $\text{F}^-$  en todas las muestras (3,34-1,92 ppm), y especialmente en la surgencia de Tía Juana 1 y 2, que son superiores a 1.5 ppm, valor recomendado por la UE y la OMS para aguas potables.

## 8. Análisis conjunto de la información

Los mapas de tasa de deformación InSAR de los periodos 2015-2021 y 2019-2023 permiten identificar de forma coherente una **cubeta de subsidencia de morfología elíptica localizada en el sector noreste del casco urbano de Monóvar**, con su epicentro situado en la zona oeste del tanatorio.

Los datos de la línea de vista del satélite, tanto en órbitas ascendentes como descendentes, también muestran una excelente coincidencia espacial.

En términos de magnitud de desplazamiento, los resultados muestran que en el primer intervalo temporal (2015-2021) analizado las mayores **velocidades de hundimiento vertical** ya alcanzaban los **-63.0 mm/año** en la zona NE, mientras que, en el periodo más reciente, comprendido entre 2019 y 2023, la mayor velocidad del desplazamiento se ha consolidado en valores de hasta **-64.6 mm/año**. Estos valores pueden considerarse similares, teniendo en cuenta la precisión de la técnica InSAR.

Por lo tanto, el ritmo de asiento que afecta al sector NE de Monóvar es extraordinariamente rápido para un entorno urbano y las series temporales muestran **patrones de deformación constante y sin aparentes fluctuaciones estacionales**, lo que difiere de las típicas curvas de consolidación de sedimentos o de suelos expansivos. No obstante, ante falta de información, no se puede descartar la actuación local de otros procesos de deformación superpuestos al principal. En este sentido, el informe “Estudio geotécnico para CEIP escritor Canyís c/ Miguel Hernández, n.º 3 C.P. 03640 Monóvar (Alicante)”, disponible en Internet, describe la existencia de importantes potencias de relleno (entre 6.2 y 9.2 m en la zona del colegio) e incluso, aunque descartan la posibilidad de que se produzcan procesos expansivos por la profundidad de las muestras (más de 6.0 m), identifican la existencia de algunas muestras con presiones de hinchamiento de entre 30 (expansividad baja a media) y 250 kPa (expansividad media a alta)(González de Vallejo y Ferrer, 2011).

La componente vertical de desplazamiento describe una **cubeta con morfología en planta elíptica de aproximadamente 600 x 500 m y una superficie aproximada de 23.6 ha**, en la que la tasa de deformación se atenúa gradualmente hacia los bordes. Aunque el InSAR únicamente permite determinar los desplazamientos horizontales en la dirección E-O, la disposición de grietas de tracción en todo el entorno de la cubeta pone de manifiesto la existencia de un patrón de convergencia horizontal, donde el terreno en la zona de la cubeta **se desplaza lateralmente hacia el centro de la cubeta con velocidades horizontales de hasta  $\pm 15$  mm/año**. Esta es la contracción centrípeta es característica de las dolinas de subsidencia por flexión, en las que el acortamiento radial tiende a ser compensado mediante el desarrollo de grietas distensivas en la zona perimetral (De Waele y Gutiérrez, 2022).

Esta dinámica se ve reforzada por las series temporales InSAR, que muestran una tendencia lineal sin signos de estacionalidad. La ausencia de fluctuaciones cíclicas descarta que el fenómeno esté vinculado a variaciones estacionales en el nivel del agua de acuíferos o a procesos de hinchamiento y retracción de suelos expansivos, apuntando en cambio a un posible proceso geológico constante y unidireccional que aparentemente no presenta indicios de estabilización. Por otra parte, el hecho de que el proceso de deformación afecte con tasas semejantes tanto a zonas con depósitos aluviales cuaternarios, como a afloramientos de Keuper, indica que el origen de la subsidencia se localiza a cierta profundidad en el seno del manto evaporítico.

Esta respuesta mecánica del terreno tiene su reflejo directo en la superficie mediante la aparición de un claro sistema de fracturación en torno a la cubeta de desplazamiento identificada en el NE del núcleo urbano. Se han cartografiado **más de 190 grietas en el terreno que se organizan de forma concéntrica al área de máxima deformación**, definiendo una elipse que coincide en gran medida con los bordes de la cubeta detectada por el satélite. Estas grietas presentan **aperturas variables que llegan a alcanzar los 0.5 m** en las zonas de mayor tracción, y **profundidades medidas de hasta 1.98 m**, aunque su alcance real es probablemente superior. La persistencia de estas fracturas, que atraviesan materiales cuaternarios recientes, afloramientos de Keuper, y todo tipo de estructuras humanas, como pavimentos, muros o

edificaciones, de forma independiente a la topografía, confirma que no son el resultado de procesos de inestabilidad de ladera ni de procesos locales de expansividad, sino la manifestación del hundimiento del terreno en una amplia zona de morfología elíptica. El hecho de que algunas grietas presenten saltos verticales y deformaciones por compresión en elementos como bordillos y aceras subraya la severidad del campo de esfuerzos horizontales descrito previamente.

Las **muestras de agua tomadas en manantiales y surgencias** próximas, como Tía Juana y Charco Amargo, revelan una **mineralización elevada**, con conductividades eléctricas que alcanzan valores de hasta 14.14 mS/cm, y una facies hidroquímica dominante clorurado sódica. Las elevadas concentraciones en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , y  $\text{SO}_4^{2-}$  y la relación molar Na/Cl igual o próxima a 1, revela dos aspectos de especial interés para este estudio. Por un lado, la presencia de halita a cierta profundidad en el Keuper, con una solubilidad extremadamente alta de 356 g/l. Por otro lado, disolución activa de halita y yeso en el sustrato. Es altamente probable que bajo la zona afectada por subsidencia se esté produciendo actualmente disolución de evaporitas mediante flujos de agua subterránea, provocando el hundimiento progresivo de los materiales suprayacentes. Las elevadas velocidades de deformación y las altas tasas de evacuación de material bajo la superficie (ca. 7068 m<sup>3</sup>/año considerando una superficie de 23.6 ha y una tasa media de hundimiento de 3 cm/año) apuntan a que la disolución de halita, altamente soluble, juega un papel primordial. El material evacuado en solución debe ser transportado mediante flujos subterráneos que circulan hacia el nivel de base (Vinalopó) a través del sustrato evaporítico karstificado y/o el aluvial del Barranco del Chaco. Uno de los autores de este informe ha documentado dolinas de subsidencia relacionadas con disolución de halita con dimensiones y patrones de deformación semejantes a la de Monóvar en diversas regiones como el entorno de Zaragoza (Desir et al., 2018; Gutiérrez et al., 2019), las Montañas Zagros (Gutiérrez y Lizaga, 2016), y el Mar Muerto (Sevil y Gutiérrez, 2023).

Asimismo, cabe indicar que los datos InSAR también muestran una **aparente continuidad de la zona de hundimiento principal identificada en la zona NE del núcleo urbano de Monóvar hacia el sur**, atravesando las zonas del Raval y Cantaranes hasta el camino del Collado de Novelda. Las deformaciones proporcionadas por el InSAR en esta zona son de menor magnitud, mostrando **tasas de desplazamiento siempre inferiores a 10 mm/año**. Además, en esta zona únicamente se han detectado algunas grietas en el terreno entre la calle Mayor y la CV-835. En el resto de la zona, principalmente agrícola, no se han encontrado grietas en el terreno. Por lo tanto, aunque esta zona de deformación se identifica al menos en dos procesados de EGMS, será necesario confirmar su continuidad en el futuro y determinar si el origen de las deformaciones guarda relación con los desplazamientos observados en la zona NE.

**La integración de las evidencias geológicas** (i.e., presencia de un manto de sal o *salt sheet*), los datos **InSAR**, la **expresión geomorfológica de la deformación** (i.e., grietas en el terreno) y los datos hidroquímicos (disolución activa de yeso y halita) indican de forma coherente **que el sector noreste del área urbana de Monóvar se encuentra afectado por una dolina incipiente relacionada con la disolución de evaporitas en el sustrato, principalmente halita**.

Aunque el proceso no ha generado todavía la morfología de depresión cerrada característica de las dolinas, las tasas de subsidencia de casi 6.5 cm/año y su persistencia en el tiempo inducen a pensar que **el proceso podría mantenerse durante dilatados periodos de tiempo**, causando alteraciones topográficas importantes y daños significativos en estructuras humanas, especialmente aquellas situadas en las zonas perimetrales donde la deformación diferencial es más acusada. Una deformación continuada a una tasa de 6.5 cm/año provocaría una alteración

topográfica de 0.65 m y 1.30 m en una y dos décadas, respectivamente. Cabe también insistir en la posibilidad de que localmente otros procesos como la expansividad de suelos o la consolidación de rellenos antrópicos, se superpongan al fenómeno de subsidencia por disolución.

## 9. Conclusiones

En el presente apartado se enumeran las conclusiones más relevantes derivadas del análisis de los datos InSAR ascendentes y descendentes mostrados en este documento:

- **Se detecta una cubeta de deformación de morfología aproximadamente elíptica en el sector NE del casco urbano de Monóvar** de dimensiones aproximadas de 600 x 500 m y 23.6 ha, con epicentro en la zona oeste del tanatorio y **desplazamientos verticales máximos de -64.6 mm/yr** durante el periodo cubierto por los datos InSAR (07/01/2019 al 18/12/2023; 1806 días, 5 años)(Figura 17). Esta zona de deformación aparentemente presenta cierta continuidad hacia el sur, atravesando la zona del Raval y de Cantaranes, hasta el camino del Collado de Novelda, próximo a las instalaciones deportivas, con desplazamientos verticales medidos en el periodo 2019-2023 inferiores a 1 cm/año. No obstante, no se puede afirmar categóricamente que se trate de otra zona afectada por procesos de deformación contigua independiente.
- El **patrón tridimensional** observado, caracterizado por una componente de desplazamiento vertical principal en toda la cubeta y otra secundaria horizontal hacia la en interior, es **característico de las dolinas de flexión relacionadas con disolución de evaporitas**. La subsidencia se atenúa hacia los márgenes, mientras que el desplazamiento horizontal tiende a disminuir hacia la zona de mayor hundimiento. En estas dolinas, la contracción radial asociada al movimiento centrípeto es compensada con el desarrollo de grietas de tracción en la zona perimetral.



*Figura 17. Panorámica de la zona principal del núcleo urbano afectada por las deformaciones. La delineación del límite de la zona afectada por subsidencia es aproximada.*

- **Las series temporales InSAR muestran desplazamientos continuos con tasas prácticamente constantes**, sin mostrar variaciones que indiquen una aceleración o desaceleración de los desplazamientos. Además, **no se observan variaciones estacionales** superpuestas a la tendencia principal que pongan de manifiesto la influencia de procesos de carácter estacional como las variaciones en el nivel del agua

de acuíferos, efectos térmicos o expansión/contracción de suelos por cambios en el contenido de humedad.

- En la zona se han reconocido numerosas **grietas de diferente apertura y persistencia dispuestas** en la franja que define aproximadamente **el borde de la cubeta** de deformación identificada mediante el InSAR, **de forma concéntrica** a esta.
- Las muestras de agua analizadas corresponden a **aguas clorurado sódicas cuya composición indica la disolución activa de halita y yeso en el sustrato triásico infrayacente (facies Keuper)**. Las aguas contienen una elevada presencia de aniones cloro y sulfato, así como de cationes sodio, calcio y magnesio. Además, el contenido de nitratos es bajo, mientras que hay una relativa elevada concentración de iones flúor. Todo ello parece confirmar el dominio del cloruro, seguido del sulfato, en la mineralización de las aguas muestreadas en los manantiales de la zona que parecen estar controladas por la disolución de las facies salinas Trias-Keuper.
- La geología del área de estudio, la distribución espacial de las deformaciones del terreno y de las estructuras humanas, el patrón espacio-temporal de los desplazamientos derivados de datos InSAR, y la información hidroquímica, permiten inferir **la existencia de una dolina de flexión incipiente relacionada con la karstificación de evaporitas triásicas, en la que la disolución de halita debe jugar un papel predominante** (Figura 18).

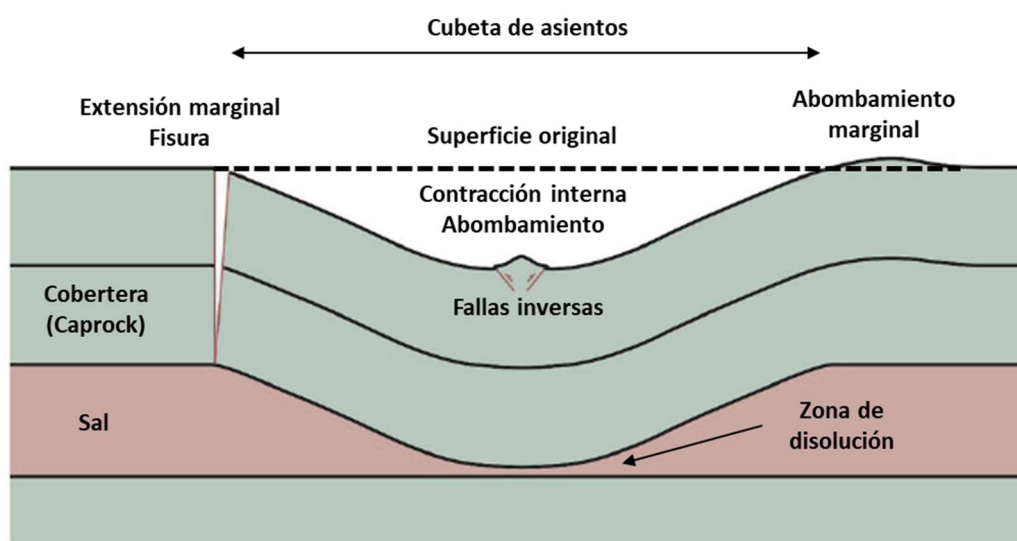


Figura 18. Esquema de una dolina de flexión en la cobertera generada por una disolución interestratificada de niveles salinos (adaptado de De Waele & Gutiérrez, 2022).

- Cabe destacar que, aunque el origen de las deformaciones que generan la cubeta de desplazamientos se atribuye a una dolina desarrollada sobre materiales evaporíticos, **no se puede descartar la superposición de otros procesos de deformación asociados a expansividad de suelos o consolidación de rellenos**. No obstante, estos procesos, caso de actuar en la zona de estudio, deberían presentar una distribución espacial local y más heterogénea y un patrón temporal distinto al medido mediante el InSAR.
- Cabe también indicar que las **grietas documentadas atraviesan materiales recientes** de edad cuaternaria **además de no seguir ningún patrón topográfico** claro, cortando la topografía independientemente del relieve existente. Además, el área de la cubeta de desplazamientos **no muestra una geomorfología cóncava clásica** identificable a simple

**vista.** Todo ello indicaría que **el proceso estudiado es relativamente reciente**, por lo que, de tratarse de una dolina, esta se encontraría en una fase incipiente de desarrollo.

## 10. Recomendaciones

A partir de las conclusiones anteriores, se establecen las siguientes recomendaciones para caracterizar, monitorear y gestionar el proceso observado:

- **Realizar un estudio geológico de detalle de la zona afectada por las deformaciones.** Este estudio aportará información complementaria que permitirá una mejor caracterización del fenómeno de subsidencia por disolución, incluyendo una cartografía precisa de la zona afectada por subsidencia. Dicha información resultará esencial en la posterior toma de decisiones tanto de carácter preventivo como correctivo. Entre las posibles técnicas a emplear de entre las descritas por Gutiérrez et al. (2008) cabe señalar: a) Sondeos profundos realizados con salmuera (fluido de perforación) para evitar la disolución de cuerpos de halita. Estos sondeos aportarían información sobre los cuerpos de sal (profundidad, espesor, evidencia de karstificación) y podrían ser empleados para el muestreo del agua subterránea responsable de los procesos de disolución activa. b) Perfiles de geofísica relativamente profundos (p.e., tomografía eléctrica de resistividades) que aporten información 2D e incluso 3D sobre las facies evaporíticas solubles. c) Trincheras (zanjas de inspección) es puntos de especial interés de cara a una mejor caracterización de la distribución y el estilo de las deformaciones asociadas a los márgenes de la dolina.

- **Continuar la monitorización de la zona.** Para ello se pueden realizar procesados específicos o actualizar la información anualmente haciendo uso de los datos EGMS. La primera opción proporciona más independencia, dado que permite tener información actualizada a la fecha en la que se procesa. Sin embargo, la segunda opción es más económica al no requerir realizar procesados específicos, aunque presenta el inconveniente de que las actualizaciones de EGMS se llevan a cabo anualmente y no están disponibles hasta el año anterior al año en curso.

Complementariamente, se recomienda la monitorización mediante otros sistemas clásicos como nivelación digital de alta precisión o medida de puntos fijos (bases) mediante sistemas globales de navegación por satélite (GNSS). La primera opción constituye la técnica más precisa para medir deformaciones verticales y ha sido utilizada de forma satisfactoria para delimitar el límite de la zona afectada por subsidencia en dolinas de flexión, a generalmente más amplia que la que se manifiesta en superficie (Desir et al., 2018; Gutiérrez et al., 2019; Sevil et al., 2020, 2021, 2024).

En el primer caso, los itinerarios de nivelación deberán partir de zonas estables situadas fuera de la zona afectada por las deformaciones. Se recomienda el establecimiento de, al menos dos itinerarios de nivelación aproximadamente perpendiculares entre sí y con direcciones aproximadas NW-SE y SW-NE.

En cuanto al establecimiento de bases GNSS cabe la posibilidad de establecer una base fija con medidas continuas, en cuyo caso se situaría en lo más próximo posible a la zona de máxima deformación. La monitorización continua del proceso permitiría conocer en tiempo real la evolución de las deformaciones en el punto monitorizado.

También se pueden instalar sensores de movimiento como medidores de grietas (*crackmeters*), medidores triaxiales de junta o clinómetros en algunos edificios o estructuras de la zona situada dentro del área que presenta deformaciones, y



complementarlos con inspecciones regulares que permitan evaluar los estados límite de las construcciones.

Asimismo, pueden llevarse a cabo vuelos fotogramétricos periódicos con drones equipados con tecnología de posicionamiento exacto (*Real Time Kinematic*, RTK) y empleando puntos de control para la generación de modelos 3D de alta precisión y resolución (nubes de puntos, ortomosaicos y modelos digitales de elevaciones). Dichos modelos pueden ser utilizados para hacer un seguimiento de la evolución de las deformaciones del terreno y la generación de modelos de desplazamiento 3D de alta resolución (p.e. comparación de nubes de puntos o modelos digitales de elevación, MDEs).

- **Considerar el proceso de deformación en la gestión del territorio.** Es muy probable que la dolina siga evolucionando de forma continua en el futuro, pudiendo incluso ampliar la superficie de la cubeta de asientos. Por otro lado, en este tipo de procesos los límites de las deformaciones son difusos, al depender de las características del terreno (p.e., sustrato, cobertera cuaternaria) y los criterios empleados para su definición (p.e., deformaciones, daños y grietas, y umbrales de estabilidad InSAR). En el caso de definir la delimitación de la zona activa a partir de las deformaciones, los límites dependen en gran medida de los umbrales de deformación que se establezcan como estables para las técnicas de auscultación consideradas. Por otro lado, en el caso de establecer los límites de la zona activa a partir de los daños observados y las grietas en el terreno, hay que tener en cuenta que estos son visibles solamente cuando se superan ciertos valores de deformación. Por ello, es conveniente definir una zona de retranqueo (*setback distance* en inglés) que defina unos límites de seguridad, que podrían ser variables en función del tipo de terreno y de uso (Gutiérrez et al., 2018). No obstante, el monitoreo periódico recomendado, permitiría redefinir en el futuro estos límites según la evolución de la distribución de desplazamientos del terreno. En cuanto a la delimitación de la zona activa, en la Figura 19a se muestra la superposición de la información recopilada (daños, grietas y desplazamientos). A partir de esta información se pueden definir perímetros basados en los desplazamientos (Figura 19b) o perímetros basados en los daños y grietas (Figura 19c). En cualquier caso, estos perímetros son preliminares y están sujetos a cambios tras la realización de investigaciones más exhaustivas mediante la aplicación de las técnicas recomendadas. Por las razones anteriormente indicadas, se recomienda establecer una zona de retranqueo respecto a estos perímetros según el criterio de los responsables de la gestión del riesgo y el territorio.

Estas conclusiones se basan únicamente en los puntos InSAR obtenidos en el procesado y en las observaciones de superficie realizadas en el campo. Por lo tanto, en las zonas sin datos de desplazamiento podrían existir zonas activas o ciertas componentes de movimiento que no hayan sido detectadas. Además, no se dispone de información de los materiales y estructuras existentes en profundidad que permitan caracterizar adecuadamente el proceso de disolución responsable del desarrollo de la dolina.

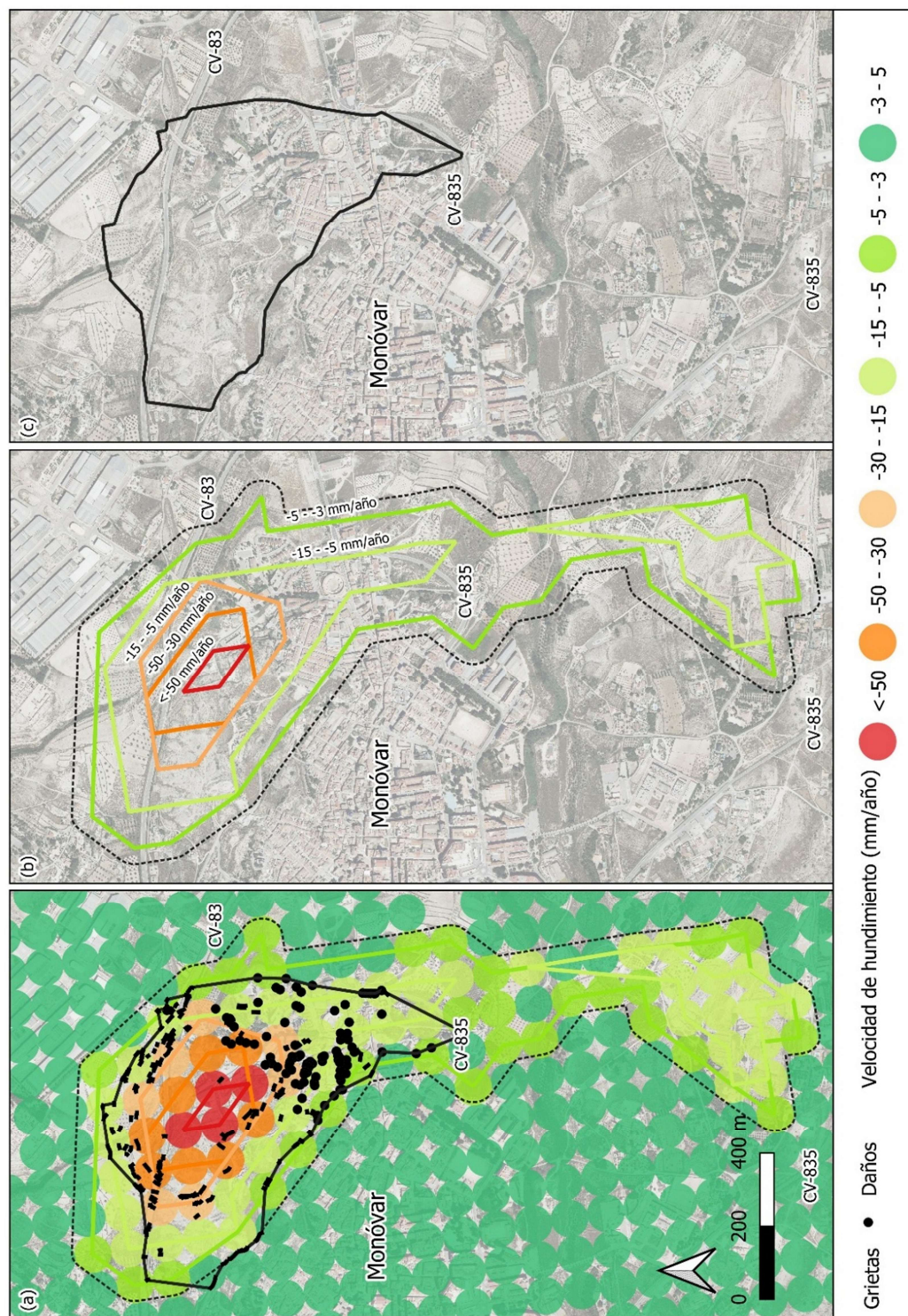


Figura 19. (a) Mapa de superposición de datos InSAR (2019-2023), daños, grietas, contornos de igual desplazamiento y envolvente. (b) Mapa de líneas de igual desplazamiento. La curva discontinua define la envolvente de los desplazamientos superiores a 3 mm/año ( $\sim 4\sigma$ ). (c) Mapa de envolvente de daños y grietas.