

Monitorización de la subsidencia del terreno de la Vega Media del río Segura mediante Interferometría SAR Diferencial Avanzada

R. TOMÁS (*), G. HERRERA (**), J. M. LÓPEZ-SÁNCHEZ (***), J. J. MALLORQUÍ (****) y J. MULAS (**)

RESUMEN La subsidencia del terreno debida a la extracción de agua constituye un riesgo geotécnico capaz de afectar a amplias zonas del territorio, causando elevadas pérdidas económicas. Este fenómeno se produce por consolidación de los suelos finos que constituyen el sistema acuífero, como consecuencia del incremento de las tensiones efectivas inducidas por los descensos piezométricos. La Vega Media del río Segura (SE de España) sufre de manera significativa este tipo de fenómeno desde los años 90, constituyendo hasta el momento el primer caso documentado, con efectos a escala comarcal en España. En este trabajo se aplica la técnica remota de Interferometría SAR Diferencial (DInSAR) conocida como de los Píxeles Coherentes (CPT) para la monitorización de la subsidencia del terreno en la Vega Media del río Segura empleando 81 imágenes procedentes de los satélites ERS-1, ERS-2 y ENVISAT de la Agencia Espacial Europea. El procesamiento proporciona datos de distribución espacial y evolución temporal de la subsidencia de toda la zona de estudio mostrando valores máximos de subsidencia próximos a los 15 cm durante el periodo 1994-2007.

GROUND SUBSIDENCE MONITORING OF THE VEGA MEDIA OF THE SEGURA RIVER BY MEANS OF ADVANCED DIFFERENTIAL SAR INTERFEROMETRY

ABSTRACT Ground subsidence caused by aquifer withdrawal is a geotechnical hazard that affects wide areas, causing high economic losses. This phenomenon is due to aquifer system fine soil consolidation produced by the increase of effective stress caused by piezometric depletion. The Vega Media of the Segura River basin (SE Spain) has suffered this type of phenomena since 90's being until the moment the first documented case at a regional scale in Spain. In this work a Differential SAR Interferometry (DInSAR) remote sensing technique called Coherent Pixel (CPT) is applied to monitoring subsidence in the Vega Media of the Segura River using 81 SAR images provided by ERS-1, ERS-2 and ENVISAT European Space Agency satellites. The processing has provided the subsidence spatial distribution and temporal evolution for the whole study area showing maximum subsidence values near 15 cm for the 1994-2007 period.

Palabras clave: Subsidencia, DInSAR, Nivel piezométrico, Sensor remoto, Riesgo geotécnico.

Keywords: Subsidence, DInSAR, Piezometric level, Remote sensing, Geotechnical hazard.

1. INTRODUCCIÓN

La subsidencia implica el asentamiento de la superficie terrestre en un área extensa debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad

de actividades humanas (Corapcioglu, 1984). Aunque se trata de un fenómeno que no ocasiona víctimas mortales, los daños económicos y sociales que causa suelen ser cuantiosos. Es de gran importancia en zonas urbanas donde los daños y perjui-

(*) Departamento de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructura Urbana, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante P.O. Box 99, E-03080 Alicante, Spain.

(**) Área Investigación de Peligrosidad y Riesgos Geológicos, Departamento de Investigación y Prospectiva Geocientífica, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Ministerio de Ciencia y Tecnología, c/ Alenza 1, E-28003 Madrid, Spain.

(***) Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal (DFISTS), Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, P.O. Box 99, E-03080 Alicante, Spain.

(****) Remote Sensing Lab., Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions, Universitat Politècnica de Catalunya, Campus Nord, Ed. D3, c/ Jordi Girona, 1-3, 08034 Barcelona, Spain.

cios ocasionados son ilimitados, suponiendo un riesgo importante para edificaciones, canales, conducciones, vías de comunicación, así como todo tipo de construcciones asentadas sobre el terreno que se deforma. Desafortunadamente, los daños aparecen posteriormente a que haya acaecido la subsidencia del terreno, cuando muchos de ellos son ya irreversibles. Se estima que existen más de 150 ciudades del mundo con problemas graves de subsidencia (Hu *et al.*, 2004). Algunos ejemplos clásicos de subsidencia por extracción de agua subterránea son México DC, Valle de Latrobe (Australia), Valle de San Joaquín y Valle de Santa Clara (California, EE.UU.), Shanghai (China), Bangkok (Tailandia) y Tokio (Japón) entre otros.

El estudio de este fenómeno hace necesaria la monitorización del mismo con el fin de determinar la extensión de la zona afectada, las velocidades de asiento, los mecanismos que rigen el fenómeno, los instantes críticos de aceleración del proceso de consolidación del terreno, así como la evaluación la efectividad de las medidas de corrección y/o mitigación que se hayan podido adoptar. La mayor parte de las veces el problema se ausculta desde la superficie, midiendo las deformaciones que la afectan. Las técnicas clásicas como las topográficas y las de instrumentación geotécnica juegan aquí un papel muy importante. No obstante, otras técnicas más modernas como el GPS y la Interferometría SAR diferencial se están imponiendo en los últimos años.

En este trabajo presentamos los resultados obtenidos al aplicar técnicas interferométricas SAR al estudio de la subsidencia en el Vega Media del río Segura (provincia de Murcia). El presente trabajo se organiza del siguiente modo. En la sección 2 se describen sucintamente los diferentes métodos de medida de la subsidencia. La sección 3 desarrolla las bases de la interferometría SAR diferencial centrándose en la técnica de los Píxeles Coherentes (CPT). El apartado 4 se centra en el problema de la subsidencia de la Vega Media del Segura describiendo la problemática de la subsidencia que afecta al valle, el marco geológico, los resultados obtenidos con el procesado SAR, así como el análisis de los resultados de subsidencia. Las principales conclusiones se recogen en el apartado 5.

2. MÉTODOS DE MEDIDA DE LA SUBSIDENCIA

Los métodos de medida de las deformaciones del terreno pueden servir para estimar distintas magnitudes de la deformación estudiada como, por ejemplo, los desplazamientos relativos entre dos cuerpos, los movimientos absolutos, las inclinaciones, los desplazamientos en una dirección, los movimientos en profundidad, etc. Estos métodos pueden clasificarse en cinco grupos (Tomás *et al.*, 2005a; Tomás, 2009): topográficos, geodésicos, fotogramétricos, de teledetección y de instrumentación geotécnica. La interferometría SAR diferencial es un método de teledetección.

La teledetección, traducción castellana del término anglosajón "remote sensing", surge para designar cualquier medio de observación remota en el que no existe contacto físico entre el medio a estudiar y el sistema sensor. La fotogrametría terrestre, aérea y espacial queda englobada dentro de esta amplia definición. Sin embargo, su uso y tratamiento para la determinación de movimientos superficiales se conoce comúnmente bajo el término de fotogrametría, habiendo constituido por sí sola una disciplina independiente. En este caso se ha optado por englobar dentro del término amplio de teledetección a aquellas técnicas no fotogramétricas que, montadas sobre plataforma espacial, aérea o terrestre, permiten estudiar el medio sin establecer contacto físico con él. Estos métodos se pueden dividir en dos grupos: métodos láser y radar. El primer grupo engloba el Scanner Láser, montado sobre plataforma te-

restre (Terrestrial Laser Scanner) o aérea (LIDAR, ALS o ALTM). El segundo grupo se subdivide, de forma similar, según el tipo de plataforma empleada para la adquisición de las imágenes SAR en: terrestre (Ground Based Synthetic Aperture Radar, GB-SAR), aerotransportado (Airborne Radar) y satélite (Spaceborne Radar). A su vez, las técnicas interferométricas pueden dividirse según el algoritmo de procesado de las imágenes en técnicas de Interferometría SAR diferencial: convencionales (conventional DInSAR) y avanzadas (Reflectores Permanentes –o Permanent Scatterers– o la Técnica de los Píxeles Coherentes –o Coherent Pixels Technique–).

Las técnicas interferométricas convencionales y avanzadas han sido muy empleadas en la monitorización de fenómenos de subsidencia minera (e.g. Ge *et al.*, 2001; Baran y Stewart, 2003; Perski y Jura, 2003; Ge *et al.*, 2003; Kircher *et al.*, 2003; Wiesmann *et al.*, 2003; Herrera *et al.*, 2007) y subsidencia por consolidación de acuíferos detríticos por extracción de agua (e.g. Galloway *et al.*, 1998; Strozzi y Wegmüller, 1999; Wegmüller *et al.*, 1999; Yonezawa y Takeuchi, 2000; Nakagawa *et al.*, 2000; Berardino *et al.*, 2000; Ferretti *et al.*, 2000; Colesanti *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2001; Colombo *et al.*, 2003; Tomás *et al.*, 2005b; Herrera *et al.*, 2009).

3. FUNDAMENTOS DE LA INTERFEROMETRÍA SAR DIFERENCIAL: LA TÉCNICA DE LOS PÍXELES COHERENTES (CPT)

Las imágenes SAR expresan la distribución espacial de la amplitud (reflectividad) y la fase de los ecos radar registrados por el sistema correspondiente a los blancos presentes en la escena. Presentan una resolución de 4 x 20 metros (azimut x alcance) en el caso de las imágenes obtenidas con los satélites de la Agencia Espacial Europea (ESA). La combinación de dos imágenes SAR de la misma escena, tomadas en instantes diferentes, da como resultado una nueva imagen conocida como interferograma. El interferograma representa la variación de la fase ($\Delta\psi_{int}$) entre las dos imágenes y la fiabilidad en su estimación depende de la coherencia, parámetro que sirve para caracterizar y medir todas las fuentes de decorrelación.

Así pues, la fase interferométrica de un interferograma ($\Delta\psi_{int}$) puede expresarse como (Hanssen, 2001; Mora, 2004):

$$\Delta\psi_{int} = \Delta\psi_{flat} + \Delta\psi_{topo} + \Delta\psi_{mov} + \Delta\psi_{atmos} + \Delta\psi_{noise} \quad (1)$$

Donde:

$\Delta\psi_{flat}$ es la componente de tierra plana relacionada con la distancia en rango.

$\Delta\psi_{topo}$ es la fase topográfica.

$\Delta\psi_{mov}$ es la componente de la fase interferométrica debida al desplazamiento del terreno entre dos imágenes SAR medida en la dirección de rango (o Line Of Sight, LOS).

$\Delta\psi_{atmos}$ es la componente de la fase relacionada con los fenómenos atmosféricos.

$\Delta\psi_{noise}$ constituye el factor de degradación de la componente de la fase interferométrica.

A su vez, los tres primeros términos de la expresión (1) pueden expresarse como:

$$\Delta\psi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda r_0} \cdot \frac{B_n \cdot \Delta r}{\tan \alpha} \quad (2)$$

$$\Delta\psi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda r_0} \cdot \frac{B_n \cdot \Delta h}{\sin \alpha} \quad (3)$$

$$\Delta\psi_{mov} = \Delta\psi_{lineal} + \Delta\psi_{no-lineal} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta v \cdot T + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta \rho_{no-lineal} \quad (4)$$

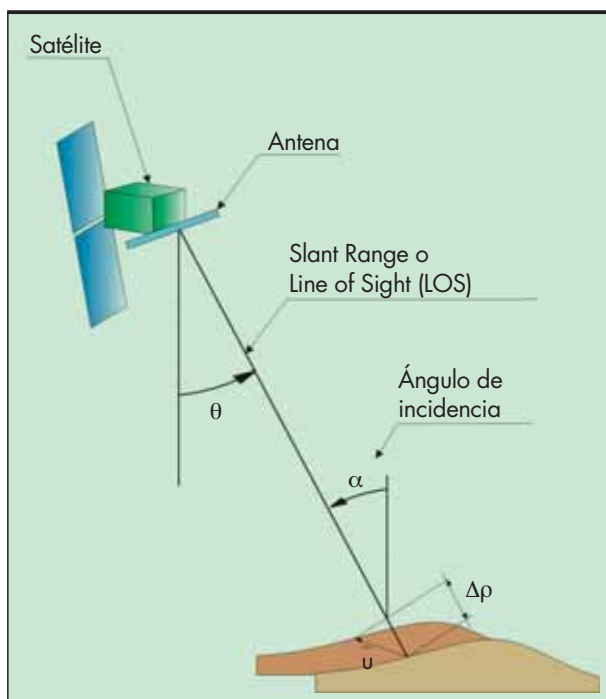


FIGURA 1. Geometría de la Interferometría SAR Diferencial considerando una baseline perpendicular nula.

Donde λ es la longitud de onda, r_0 es la distancia en alcance, B_n es la baseline perpendicular, Δr es el incremento del alcance entre píxeles, α es el ángulo de incidencia, Δh y Δv son respectivamente los incrementos de altura y velocidad entre píxeles vecinos, T es la línea de base (baseline) temporal entre las dos adquisiciones SAR y $\Delta\rho_{no-lineal}$ es el término no lineal de desplazamiento.

El principal objetivo de esta técnica consiste en cancelar o minimizar, en la medida de lo posible, todos los términos que intervienen en la fase interferométrica ($\Delta\psi_{int}$) excepto aquel que hace referencia a las deformaciones del terreno ($\Delta\rho$). Debe indicarse que empleando DInSAR sólo podemos estimar la proyección ($\Delta\rho$) del vector de deformación total ($\vec{u}$) sobre la línea de vista (LOS), conocido con "slant range o line of sight" (Figura 1).

Por otro lado tenemos que, considerando exclusivamente el término correspondiente a la deformación asociado a un ciclo de la fase, podemos escribir:

$$\Delta\rho_{ciclo} = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\psi \quad (5)$$

Si, además, tenemos en cuenta que la longitud de onda (λ) de los satélites ERS y ENVISAT es de 5.6 cm, podemos establecer que a una franja interferométrica (ciclo de 2π) le corresponde una deformación de 2.8 cm en la dirección de la LOS. Esto demuestra que la Interferometría SAR Diferencial presenta una gran sensibilidad a la deformación.

La técnica CPT se divide en dos etapas que corresponden a la extracción de la componente de deformación lineal y la no lineal. El cálculo de la componente lineal incluye la estimación de la velocidad media de deformación y el error del MDT. Ambos términos se calculan ajustando una función a aquellos píxeles de la escena que presentan una buena coherencia interferométrica a lo largo del tiempo. El término no lineal se determina posteriormente aplicando un filtrado espacio-tem-

poral para la extracción de los artefactos atmosféricos y las componentes de baja y alta resolución de la deformación no lineal. Ésta es precisamente una de las principales ventajas de esta técnica avanzada frente a la Interferometría SAR convencional, el hecho de que la componente atmosférica puede ser aislada debido al comportamiento variable en el tiempo y en el espacio de los artefactos atmosféricos, frente al comportamiento estático del término de movimiento no lineal.

Por lo tanto, podemos decir que la obtención de los mapas de deformación a partir de imágenes SAR constituye una labor compleja que comprende varias etapas: enfoque de imágenes a partir de los datos crudos, corrección y filtrado para la elaboración de los interferogramas, cálculo de las órbitas de los satélites y procesamiento interferométrico propiamente dicho y descrito anteriormente. Evidentemente, la complejidad del procesamiento así como las diferentes condiciones que intervienen (número de imágenes disponibles, distribución de baselines temporales y espaciales, diferencias Doppler, etc.) hacen prácticamente imposible establecer una única expresión capaz de evaluar el error de procesamiento de esta técnica. No obstante, de los resultados obtenidos al aplicar la técnica CPT en otras áreas de estudio (Mora *et al.* 2003; Lanari *et al.*, 2004) puede asumirse que el error cometido en la estimación de la componente lineal es de orden milimétrico, mientras que el error acumulado para el término no lineal es de ± 0.5 cm en el peor de los casos.

Para una lectura más detallada de la técnica CPT se remite al lector a los trabajos de Mora *et al.*, (2003) y Mora (2004).

4. MONITORIZACIÓN DE LA VEGA MEDIA DEL RÍO SEGURA MEDIANTE INTERFEROMETRÍA SAR

4.1. PROBLEMÁTICA Y DATOS PREVIOS

La zona de estudio comprende un amplio sector de la Vega Media del río Segura cuya geografía coincide básicamente con el área metropolitana de la ciudad de Murcia. La Vega Media del Segura se extiende desde la presa de Contraparada hasta el límite provincial con Alicante siendo su superficie de unos 206 km².

La explotación intensiva de un acuífero detrítico para satisfacer las demandas agrícolas y urbanas se agravó especialmente durante el periodo de sequía 1992-1995. Fue entonces cuando los niveles piezométricos comenzaron a descender ocasionando en los niveles del terreno más superficiales su consolidación como consecuencia del incremento de las tensiones efectivas. La consolidación del terreno se manifestó con mayor intensidad en la superficie del terreno ocasionando daños en las infraestructuras urbanas y en unos 150 edificios de la ciudad de Murcia por valor de 50 millones de euros (Rodríguez y Mulas, 2002; Mulas *et al.*, 2003). La Figura 2 muestra algunos de los daños ocasionados por la subsidencia en la ciudad de Murcia. Con posterioridad, en los periodos 2000-01 y 2005-actualidad, otros episodios de explotación intensiva del acuífero han dado lugar a sucesivos descensos piezométricos en el mismo.

4.2. MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra situada en el sector oriental de la Cordillera Bética. El valle se encuentra delimitado por sendas fallas activas que han deformado los sedimentos más antiguos constituyendo un sinclinal (Montenat *et al.*, 1990) (Fig. 3). Los sedimentos recientes se han depositado gradualmente sobre los materiales más antiguos. El basamento está constituido por materiales Permo-Triásicos de las Zonas Internas de las Cordillera Bética que sólo afloran en los bordes de la cuenca.



FIGURA 2. Efectos de la subsidencia observados en algunos elementos urbanos de la ciudad de Murcia (deformación de aceras y apertura de las juntas medianeras).

El relleno de la cuenca queda dividido en tres unidades principales (Fig. 3). Los materiales más antiguos están constituidos por margas del Mioceno Superior con potencias superiores a 600 m (Cerón y Pulido-Bosch, 1996; Mulas *et al.*, 2003). Sobre estos materiales se disponen margas y arcillas con intercalaciones de conglomerados y areniscas de edad Plio-Cuaternaria. Estos materiales pueden llegar a alcanzar los 200 metros en algunos puntos de la cuenca (Aragón *et al.*, 2004) y presentan un gran interés desde el punto de vista hidrogeológico. La tercera unidad está constituida por depósitos continentales recientes (depósitos de canal, llanura de inundación, abanicos aluviales, etc.) constituidos por abundante arcilla y limo en las zona de llanura de inundación, y arenas en los canales y abanicos aluviales. El espesor de estos materiales varía entre 3 y 30 metros (Rodríguez-Jurado *et al.*, 2000).

Desde el punto de vista hidrogeológico, pueden diferenciarse dos unidades principales (Cerón y Pulido-Bosch, 1996; Aragón *et al.*, 2004). La primera está constituida por los sedimentos recientes, superficiales, de gran compresibilidad. Sus propiedades hidrogeológicas son pobres debido a la gran abundancia de finos, variando la conductividad hidráulica vertical y horizontal entre 0.03 y 0.1 metros/día y 0.01-5 metros/día respectivamente (Aragón *et al.*, 2004). La segunda unidad, de mejores características geotécnicas, se sitúa debajo de los sedimentos recientes y consiste en una serie de alternancias de grava y arcillas que constituyen un acuífero multicapa muy productivo. Este acuífero dispone, a techo, de unos 10-30 metros de gravas con 10-100 metros/día y 1-50 metros/día de conductividad hidráulica horizontal y vertical respectivamente (Aragón *et al.*, 2004).

4.3. PROCESADO

Para el procesamiento interferométrico se han empleado un total de 81 imágenes SAR procedentes de los satélites ERS-1 (6 imágenes), ERS-2 (56 imágenes) y ENVISAT (19 imágenes) adquiridas entre abril de 1993 y marzo de 2007, comprendiendo por tanto un periodo aproximado de catorce años. Con el fin de minimizar el tiempo de procesamiento y mejorar la coherencia se ha llevado a cabo una triangulación de Delaunay en tres dimensiones de los valores de *baseline* temporal, espacial y diferencia Doppler correspondientes a las imágenes disponibles, para así determinar el número óptimo de enlaces (interferogramas) existentes entre imágenes y poder así evitar cálculos redundantes. A partir de esta triangulación (de las relaciones entre interferogramas) y haciendo uso de los algoritmos propuestos por Blanco *et al.*, (2006) se han seleccionado aquellos interferogramas que permiten optimizar el procesamiento. El número total de interferogramas obtenido ha sido de 185. Estos cuentan con líneas de base (baselines) espaciales y temporales máximas de 250 m y 1000 días (aproximadamente 2.7 años) respectivamente y una diferencia máxima de Doppler entre imágenes de 800 Hz.

4.4. RESULTADOS

El procesamiento CPT proporciona el historial temporal de las deformaciones en cada píxel coherente seleccionado durante el procesamiento tras cumplir con los criterios de calidad establecidos previamente. Este tipo de información permite dotar a los resultados espaciales de deformación de una tercera variable, el tiempo.

La distribución de subsidencia medida en la totalidad de la Vega Media del río Segura mediante la técnica CPT-DInSAR

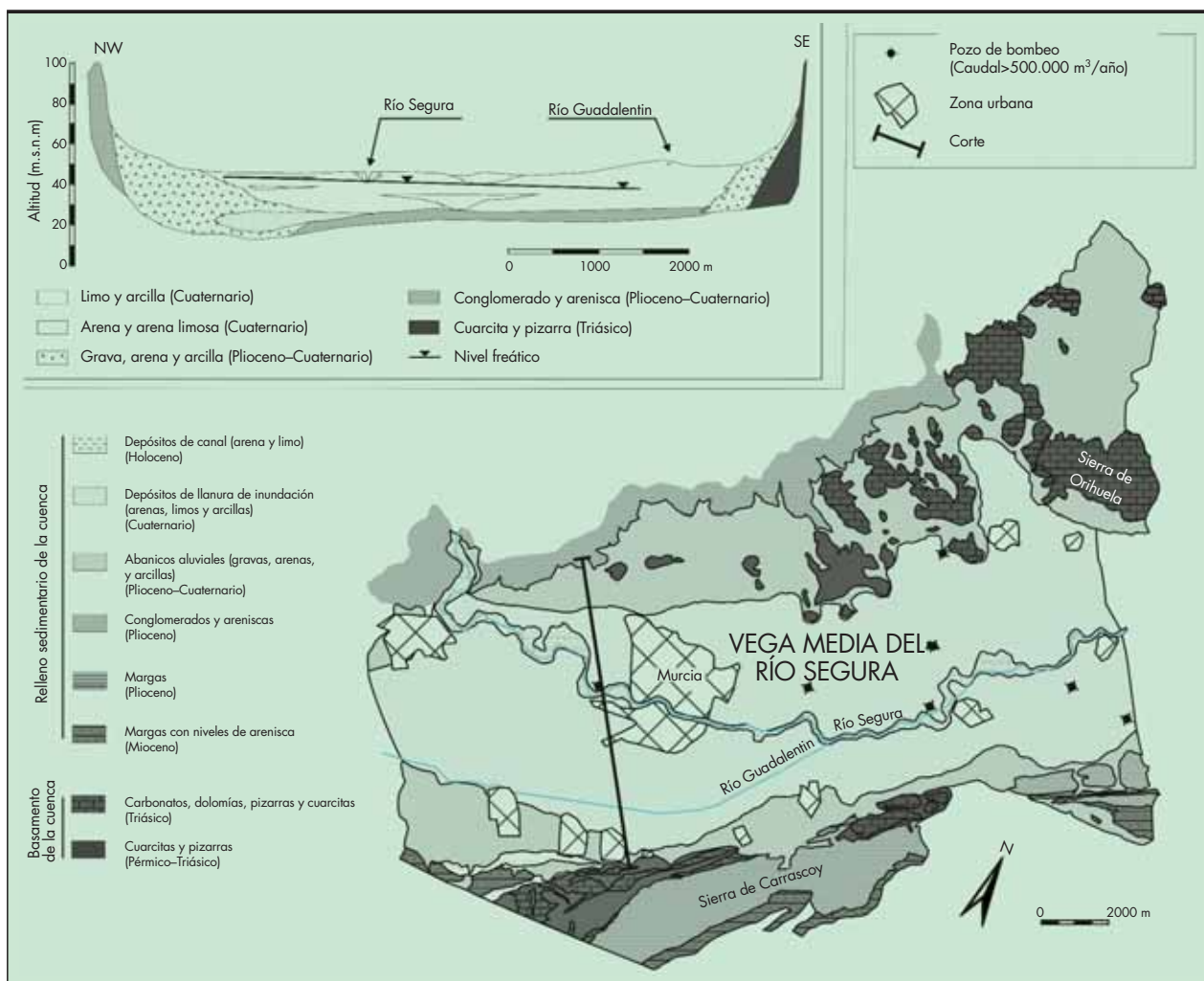


FIGURA 3. Esquema geológico de la Vega Media del Río Segura (basado en Aragón *et al.*, 2004).

para el periodo temporal 1993-2007 se muestra en la Figura 4. Como puede observarse en ella, durante el referido periodo de tiempo, que abarca aproximadamente 14 años, se ha producido una importante subsidencia generalizada en todo el valle, con valores que llegan puntualmente hasta 15.5 cm.

Los mayores asentamientos absolutos se localizan en el S y SE de la ciudad de Murcia, así como en todo el corredor E del valle (localidades de El Raal y Beniel; Figura 4). En las zonas del borde Norte y Sur de la cuenca Media del Segura, coincidiendo con los relieves que delimitan la cuenca, puede diferenciarse una notable estabilidad de la superficie terrestre (Figura 4).

Un análisis espacial realizado con ayuda del SIG ArcGIS para los barrios y pedanías de la zona de estudio pone de manifiesto la existencia de importantes extensiones afectadas por asentamientos superiores a 5 cm en Aljucer, Bº del Progreso, Bº de la Victoria, El Canute, Ermita de los Remedios, Los Dolores, Molina de Nerva, Llano de Brujas, Patiño, Puente de los Cinos, San Ginés, San Roque, El Secano y Las Tejas, entre otros. Asimismo se observa un predominio de la estabilidad del terreno en Agri dulce, Alcantarilla, Campus de Espinardo, La Nora, Los Garres, Guadalupe, Jabalí Nuevo, Jabalí Viejo y El Puntal, entre otros.

La Figura 5a muestra los valores de subsidencia medidos en la ciudad de Murcia entre 1993 y 1997, periodo que engloba la primera crisis piezométrica importante sufrida en la

Vega Media que se ha podido estudiar. Los asentamientos medidos durante este periodo fueron inferiores a 4 cm, afectando principalmente al S y SE de la ciudad. Un elevado porcentaje de píxeles coherentes localizados en la ciudad presentan valores de subsidencia dentro del intervalo ± 1 cm.

En la figura siguiente (Figura 5b) se representa la subsidencia acumulada desde 1993 hasta 2001, tras otra crisis piezométrica. Esta crisis fue de menor entidad que la de principios de los años 90. Los asentamientos acumulados medidos desde 1993 alcanzaron en unos pocos píxeles los 5 cm, aunque la mayor parte de la ciudad es estable.

La Figura 5c representa las deformaciones correspondientes al periodo completo 1993-2007. Por lo tanto, incluye las deformaciones ocurridas durante las crisis piezométricas de los periodos 1993-1997, 2000-2001 y el último iniciado en 2005. Durante este periodo de tiempo los valores de subsidencia en la ciudad de Murcia fueron inferiores a 10 cm.

La subsidencia media en los materiales detríticos de la Vega Media del Segura durante el periodo 1993-2007 es de 2.5 y 2.4 cm, según se considere toda la zona procesada de la Vega Media del Segura o se limite a la ventana de procesado de la ciudad de Murcia. Los mismos valores obtenidos para el periodo 1993-1997 son de 0.86 y 0.81 cm, respectivamente, y de 1.3 y 1.3 cm para el periodo 1993-2007.

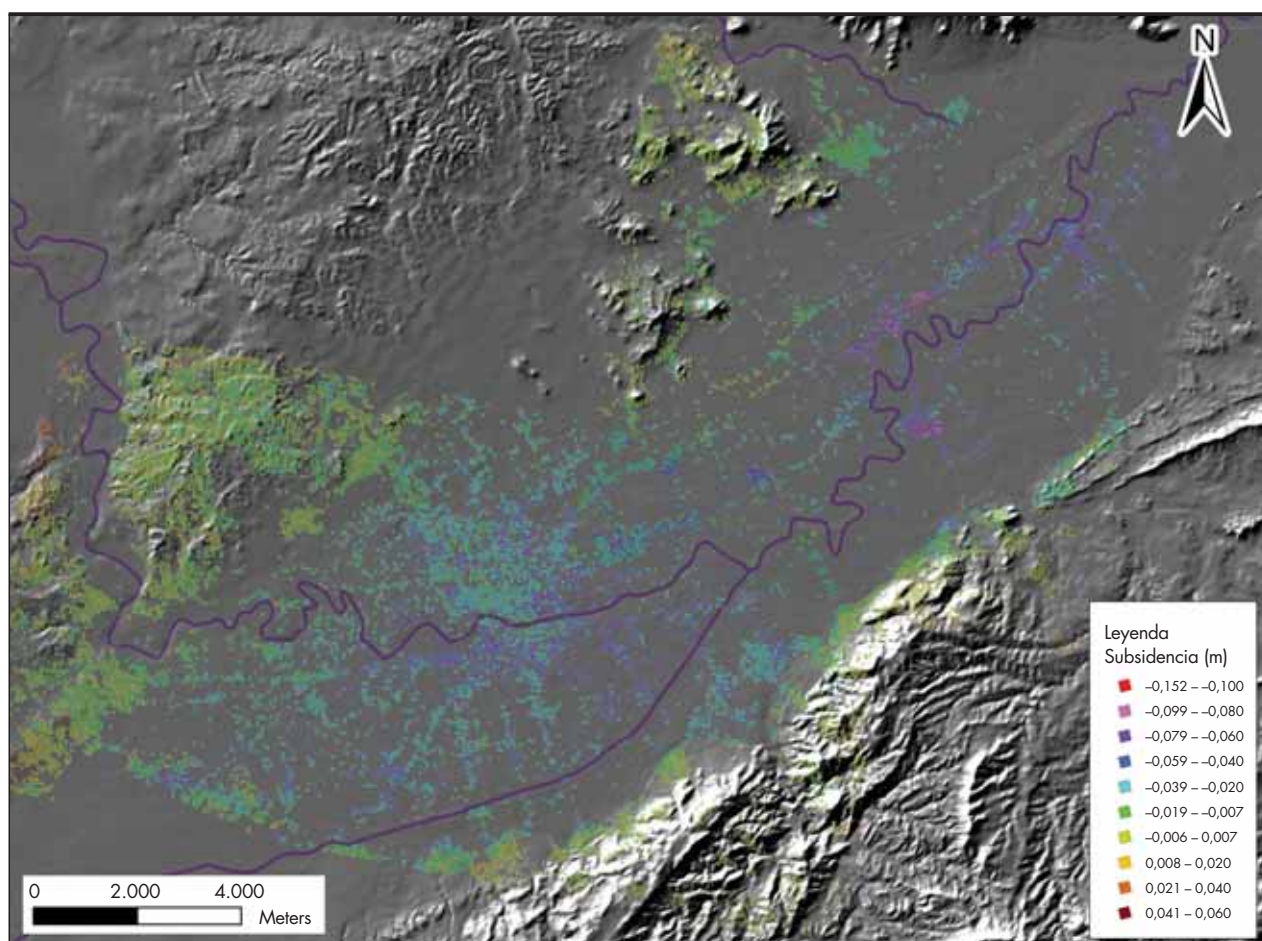


FIGURA 4. Distribución de la subsidencia correspondiente al periodo 1993-2007 obtenida mediante Interferometría SAR diferencial de la Vega Media del Segura.

La comparación de los valores de subsidencia medidos mediante la técnica CPT en los pozos con piezómetros poneponen de manifiesto la estrecha relación existente entre la subsidencia y las variaciones piezométricas en el primer nivel de gravas (Figura 6).

4.5. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Una vez realizado el procesado interferométrico de la zona de estudio y conocidas las deformaciones (temporal y espacialmente), se ha procedido a validar dichos resultados para detectar, si así fuera, comportamientos o valores anómalos que nos alertaran de la existencia de errores en la elección de los parámetros de procesado. La validación se ha realizado comparando puntualmente las deformaciones obtenidas a partir del procesado DInSAR con las lecturas de deformación instrumentales *in situ*. La coincidencia aceptable entre ambos tipos de lecturas nos permitirá aceptar como buenos los resultados DInSAR obtenidos para toda el área de estudio.

El IGME instaló en el año 2001 un total de 22 extensómetros (16 de varilla y 6 incrementales) a profundidades comprendidas entre 0 y 20.8 metros (Peral *et al.*, 2004). De todos ellos, actualmente sólo 15 están operativos. Los extensómetros de varilla se miden mediante comparadores mecánicos cuya resolución es de 0.01 mm, siendo su precisión del orden de ± 0.5 mm. Los extensómetros incrementales emplean sistemas eléctricos de medida que proporcionan precisiones finales de ± 0.1 mm.

Se ha estudiado la evolución temporal de la subsidencia medida mediante ambas técnicas, CPT y extensómetros, durante el periodo 2001-2007. Para realizar la comparación entre ellas se ha proyectado la lectura extensométrica sobre la Línea de Vista (LOS) del satélite, y se ha interpolado el primer valor de subsidencia obtenido mediante extensómetros en el gráfico de valores de deformación proporcionado por la técnica DInSAR. Posteriormente se han determinado las diferencias entre ambas gráficas, obteniendo así el error medio (considerando el signo de la diferencia entre ambas lecturas) y el error medio absoluto, con sus respectivas desviaciones estándar. La Figura 7 muestra la superposición de los valores extensométricos e interferométricos para el periodo 1993-2007.

Como puede apreciarse en la Figura 7 la coincidencia de lecturas entre ambas técnicas (extensómetros y CPT) es buena en general, aunque existen algunos puntos en los que ambas técnicas difieren de forma considerable, como son en los extensómetros V1, V4 y Ei6.

La Tabla 1 muestra la estadística obtenida de la comparación de los datos obtenidos al aplicar la técnica CPT y los datos instrumentales proporcionados por los extensómetros. La segunda columna indica el espesor de suelo blando, susceptible de sufrir procesos de consolidación ante cambios piezométricos, medido a partir de las columnas litológicas disponibles en los sondeos instrumentados mediante extensómetros o a partir de columnas litológicas de sondeos próximos disponibles. Este valor resulta de gran interés para compararlo con los datos de

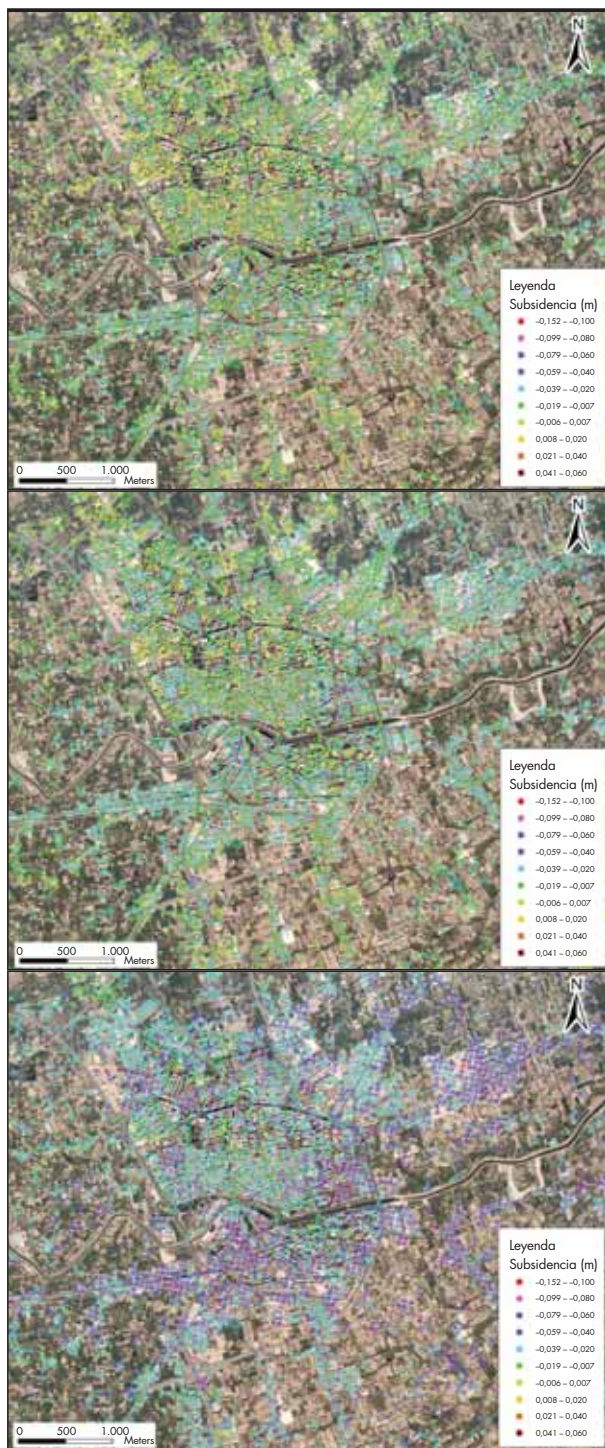


FIGURA 5. Mapa de subsidencia de la ciudad de Murcia correspondiente a los periodos (a) 1993-1997, (b) 1993-2001 y (c) 1993-2007.

la siguiente columna, que recoge la profundidad instrumentada mediante los extensómetros. Las cuatro columnas sucesivas corresponden al error medio y medio absoluto con sus respectivas desviaciones estándar de las dos series temporales de datos (deformación CPT y extensómetros). En la siguiente columna de datos se incluye la distancia disponible entre el centro del píxel coherente considerado y el extensómetro. Hay que

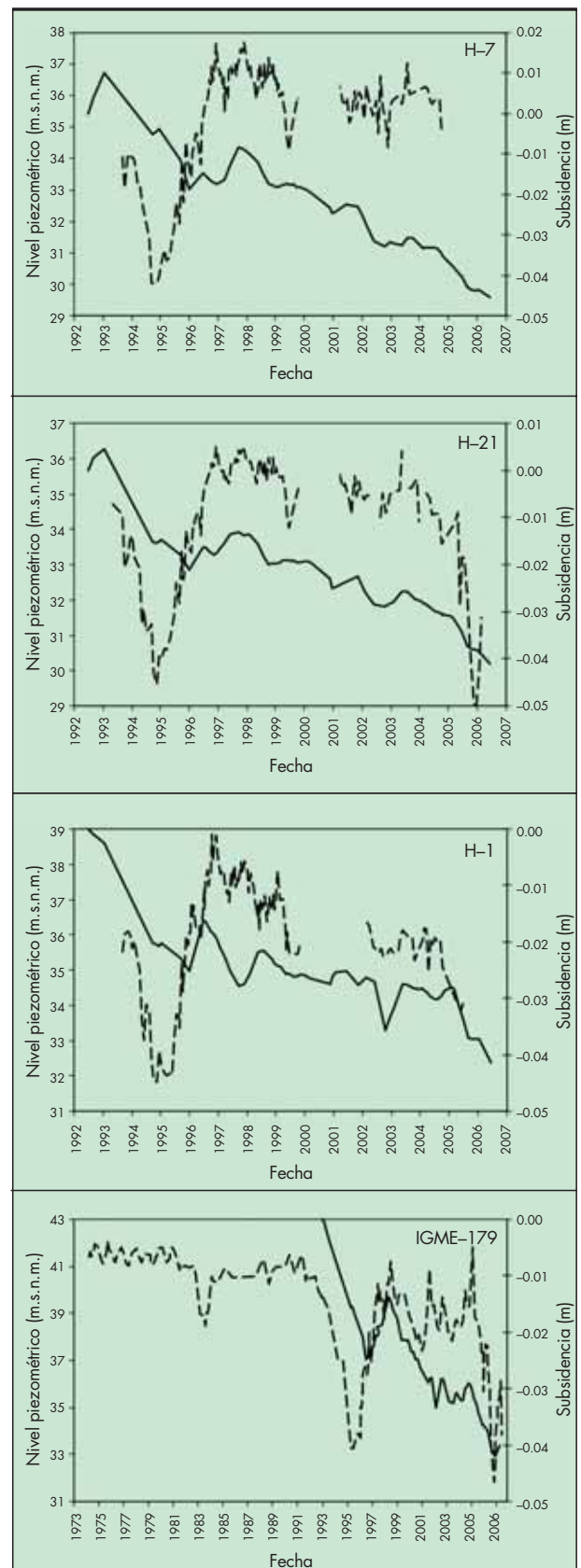


FIGURA 6. Relación existente entre la subsidencia del terreno (línea continua) medida en varios pozos de la zona de estudio y el nivel piezométrico de las gravas (línea discontinua).

Extensómetro	Espesor/Profundidad (m)		Error medio, μ (mm) CPT-Ext	Desv. est. del error medio (mm), σ	Error medio absoluto, ϵ (mm) CPT-Ext	Desv. est. del error medio absoluto, (mm)	Distancia del extensómetro al píxel CPT (m)	Coherencia media (γ_{media})	Error de MDT (m)
	Suelo	Extens.							
Ei-1	22.0	14.4	-2.6	4.7	3.2	4.3	15.86	0.47	6.55
Ei-2	21.5*	20.8	-3.9	3.6	4.1	3.3	67.48	0.38	2.17
Ei-3	26.0	20.8	-2.2	3.1	2.9	2.5	92.66	0.39	1.78
Ei-4	>22.0*	19.8	-5.4	5.3	5.5	5.2	91.21	0.55	1.89
Ei-6	>15.0*	10.8	-9.0	6.0	9.0	6.0	70.17	0.44	4.81
V-1	-	10.0	6.6	5.1	6.6	5.0	31.62	0.55	3.26
V-13	18.2	15.0	-3.0	4.6	4.0	3.8	12.27	0.36	4.07
V-14	20.0	10.0	-3.0	3.9	3.5	3.4	25.23	0.39	2.25
V-15	20.0	10.0	-1.6	2.8	2.1	2.4	44.72	0.40	2.43
V-17	20.0	10.0	-5.4	5.8	5.4	5.8	42.02	0.42	2.72
V-3	18.0	10.0	-2.1	3.5	2.2	3.4	53.87	0.48	0.72
V-4	-	15.0	-7.8	8.0	8.7	7.0	58.25	0.48	-1.38
V-5	26.0	10.0	2.0	5.4	4.6	3.2	78.84	0.42	2.28
V-6	-	10.0	0.5	5.3	4.1	3.1	84.73	0.38	5.51
V-8	19.0	15.0	-2.1	3.0	2.4	2.8	116.75	0.38	1.93
PROMEDIOS	-	-	-2.6	4.7	4.5	4.1	59.0	0.4	2.7
MÁXIMO	-	-	6.6	8.0	9.0	7.0	116.8	0.6	6.5
MÍNIMO	-	-	-9.0	2.8	2.1	2.4	12.3	0.4	-1.4

TABLA 1. Estadística correspondiente a la comparación temporal de los datos de deformación CPT y extensométrica durante el periodo de Febrero de 2001 a Marzo de 2007. Los datos de espesor de suelo blando marcados con asterisco han sido obtenidos directamente de la columna litológica del sondeo extensométrico. El resto de espesores han sido determinados a partir de sondeos geotécnicos próximos a los extensómetros.

tener en cuenta que el píxel es cuadrado, con 60 m de lado, por lo que si la distancia del extensómetro al centro del píxel es aproximadamente mayor de 43 m, podremos afirmar con toda seguridad que el extensómetro se localiza fuera del píxel, y por lo tanto, proporciona las medidas de deformación de una zona próxima al extensómetro. Las últimas columnas corresponden a la coherencia media y el error de MDT obtenidos del procesado interferométrico. Estos parámetros proporcionan una idea de la calidad del procesado. Coherencias elevadas indican estabilidad de la señal, mientras que errores de MDT bajos son igualmente indicativos de un buen ajuste del modelo a los datos interferométricos.

En la Tabla 1 observamos que el error medio de la comparación CPT-extensómetros es de -2.6 ± 4.7 mm. Este error se incrementa hasta 4.5 ± 4.1 mm si consideramos los valores absolutos de las diferencias entre ambas técnicas de medida. La diferencia máxima entre ambos tipos de medida es de -9.0 mm.

En la misma tabla, podemos observar que los errores medios son siempre negativos excepto para los extensómetros V5 y V6, en los que prácticamente coinciden las medidas de ambas técnicas, y el extensómetro V1, en el que las deformaciones CPT son menores que las instrumentales.

5. CONCLUSIONES

La técnica CPT es una técnica remota que puede emplearse para la medida de deformaciones de la superficie terrestre con

gran efectividad. Esta técnica puede además complementarse con otro tipo de medidas (extensómetros, GPS, topografía convencional, etc.) con el fin de validar los resultados obtenidos con la primera así como obtener información de aquellos puntos de la escena en la que se espera una menor reflectividad y por lo tanto los resultados interferométricos son de menor calidad.

En la Vega Media del río Segura, los resultados obtenidos son acordes con los proporcionados por las técnicas instrumentales empleadas (extensómetros) y además muestran una estrecha relación con la piezometría.

Los asientos medidos en la Vega Media del río Segura proporcionan valores siempre inferiores a 15 cm durante el periodo 1994-2007, alcanzando las mayores velocidades de asiento durante las sequías que se produjeron durante los periodos 1995-1997 y 2005-2007 en la que los descensos piezométricos llegaron en casos extremos a los 15 metros.

Esta técnica ha permitido también evaluar la magnitud del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Murcia, una vez que ésta ya se había producido, proporcionando valores y series temporales de subsidencia para periodos de los cuales no se disponía de ningún tipo de información cuantitativa de la subsidencia. Hay que tener en cuenta que los primeros daños se detectaron en el año 1998, y no se instrumentó el fenómeno hasta 2001. Esto supone una aportación muy valiosa al conocimiento del proceso que tuvo lugar con anterioridad a la instalación de la red instrumental, y del cual no se disponía de información cuantitativa sobre el proceso de subsidencia.

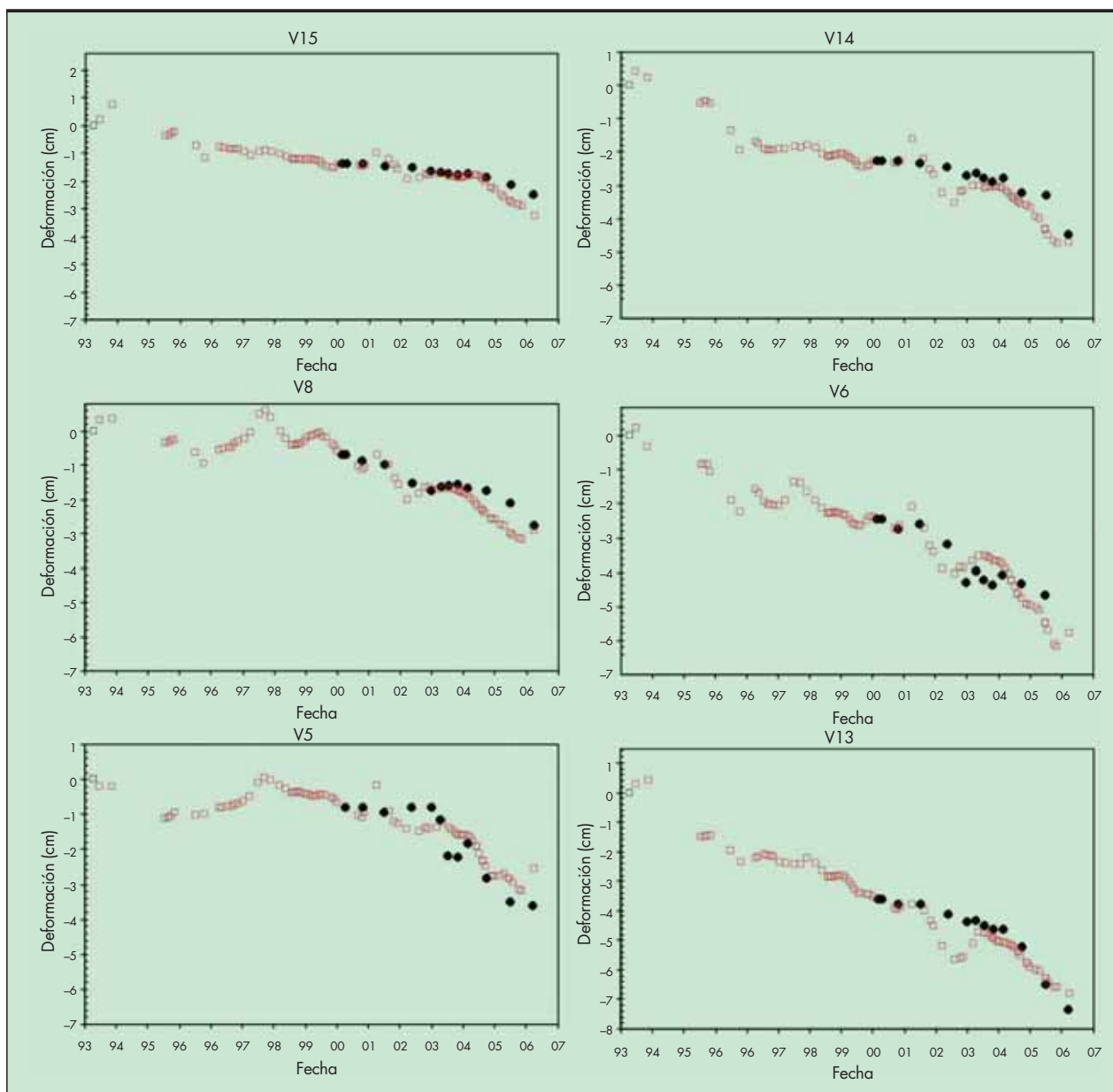


FIGURA 7. Superposición de los datos de subsidencia medidos con los extensómetros (puntos) y la interferometría SAR diferencial (cuadrados).

Por lo tanto, podemos concluir diciendo que una de las principales ventajas de esta técnica estriba en el hecho de que permite estudiar la evolución de un fenómeno que ocupa una gran extensión, como es el caso de la subsidencia, a relativo bajo coste en comparación con otras técnicas como el GPS y la topografía. Además, permite llevar a cabo un seguimiento progresivo del proceso de subsidencia a lo largo del tiempo que facilite la toma de decisiones y la gestión del ciclo integral del agua en zonas tan problemáticas como la Vega Media del río Segura.

El lanzamiento de nuevas plataformas espaciales como el TerraSAR-X y la implementación de la selección de píxeles por estabilidad de amplitud permitirán en breve reducir la resolución final del píxel, pudiendo así obtener información de carácter puntual de las deformaciones sufridas por un mismo elemento (edificio, viaducto, talud, etc.). Asimismo,

en aquellas zonas en las que la coherencia sea baja o se desee contar con una reflectividad constante en el tiempo se pueden instalar unos elementos (triedros) capaces de reflejar gran cantidad de señal que reciben el nombre de reflectores permanentes.

6. AGRADECIMIENTOS

Al profesor J. Delgado (UA). Las imágenes SAR empleadas en este trabajo han sido proporcionadas por la European Space Agency (ESA) en el marco del proyecto EO Cat.1-2494. Este estudio ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y EU FEDER (TEC2008-06764) y por la Universidad de Alicante (Proyectos VIGROB-157 y VIGROB-184). Los datos piezométricos y extensométricos han sido cedidos por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aragón, R., García-Aróstegui, J.L., Lambán, J., Hornero, J., Fernández-Grillo, A.I. (2004). Impacto de la explotación intensiva de aguas subterráneas en la ciudad de Murcia (España). Análisis hidrogeológico. Proc. XXXIII Congress of IAH-ALHSUD, Zacatecas, Mexico. Conference on Groundwater Flow Understanding from local to regional scales, CD ROM.
- Baran, I., Stewart, M.P. (2003). Small scale surface deformation monitoring in mining regions using differential radar interferometry. Proc. 11th FIG Sym. Def. Measur., Santorini, 25-28 May. Disponible en: <http://www.fig.net/commission6/santorini/>
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 40, 2375-2383.
- Blanco, P., Mallorquí, J.J., Duque, S., Navarrete, D. (2006). Advances on DInSAR with ERS and ENVISAT data using the Coherent Pixels Technique (CPT). IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., IGARSS 2006, Denver, Colorado, July 31-August 2004, 4, 1898-1901.
- Cerón, J.C., Pulido, A. (1996). Groundwater problems resulting from CO2 pollution and overexploitation in Alto Guadalentín aquifer (Murcia, Spain). Env. Geol., 28, 223-228.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001). Comparing GPS, optical levelling and permanent scatterers. Proc. IGARSS'01, Sydney, Australia. IEEE Intl. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 6, 2622-2624.
- Corapcioglu, M.Y. (1984). Land subsidence a state of the art review. Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media. Nijhoff, Dordrecht, 369-444.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 38, 2202-2212.
- Galloway, D.L., Hudnut, K.W., Ingebritsen, S.E., Phillips, S.P., Peltzer, G., Rogez, F., Rosen, P.A. (1998). Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar; Antelope Valley, Mojave Desert, California. Water Resources Research, 34, 2573-2585.
- Ge, L., Chang, H., Qin, L., Chen, M., Rizos, C. (2003). Differential radar interferometry for mine subsidence monitoring. Proc. 11th FIG Sym. Def. Measur., Santorini, 25-28 May. Disponible en: <http://www.fig.net/commission6/santorini/>
- Ge, L., Rizos, C., Han, S., Zebker, H. (2001). Mining subsidence monitoring using the combined InSAR and GPS approach. Proc. 10th FIG Sym. Def. Measur., Orange, California, USA, 19-22 March. Disponible en: http://www.fig.net/com6_orange/
- Hanssen, R.F. (2001). Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. (308 pp.). The Netherlands: Kluwer Academic publisher.
- Herrera G., Fernandez-Merodo, J., Tomás, R., Cooksley, G., Mulas, J., (2009). Advanced interpretation of subsidence in Murcia (SE Spain) using A-DInSAR data-modelling and validation. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 647-661.
- Herrera, G. (2007). Aplicación de la Interferometría Diferencial Avanzada (CPT-DInSAR) al estudio de los riesgos geológicos y mineros. Universidad Politécnica de Madrid. PhD Thesis, 206 pp.
- Hu, R.L., Yue, Z.Q., Wang, L.C., Wang, S.J. (2004). Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. Eng. Geol., 76, 65-77.
- Kircher, M., Roth, A., Adam, N., Kampes, B., Neugebauer, H.J. (2003). Remote sensing observation of mining induced subsidence by means of differential SAR-Interferometry. Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., IGARSS 2003, Toulouse, 21-25 July, 1, 209-211.
- Montenat, C., Ott d'Estevou, P., Coppier, G. (1990). Les basins néogènes entre Alicante et Cartagena. Doc. Et Trav. IGAL, 12-13, 313-368.
- Mora, O. (2004). Advanced differential SAR techniques for detection of terrain and building displacements. Ph. D. Thesis, Polytechnic University of Catalonia, 182 pp.
- Mora, O., Mallorquí, J.J., Broquetas, A. (2003). Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 41, 2243-2253.
- Mulas, J., Aragón, R., Martínez, M., Lambán, J., García-Arostegui, J.L., Fernández-Grillo, A.I., Hornero, J., Rodríguez, J., Rodríguez, J.M. (2003). Geotechnical and hydrological analysis of land subsidence in Murcia (Spain). Proc. 1st International Conference on Groundwater in Geological Engineering, RMZ-M&G, Materials and Geoenvironment, Bled, Slovenia, 50, 249-252.
- Nakagawa, H., Murakami, M., Fujiwara, S., Tobita, M. (2000). Land subsidence of the Northern Kanto Plains caused by ground water extraction detected by JERS-1 SAR interferometry. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., IGARSS 2000, Hawaii, 24-28 July, 5, 2233-2235.
- Peral, F., Rodríguez, A., Mulas, J. (2004). Control of subsidence with borehole extensometers and surveying measurements in Murcia (Spain). Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Rotterdam, Holland, 1171-1176.
- Perski, Z., Jura, D. (2003). Identification and measurement of mining subsidence with SAR interferometry: potentials and limitations. Proc. 11th FIG Sym. Def. Measur., Santorini, 25-28 May. Disponible en: <http://www.fig.net/commission6/santorini/>
- Rodríguez Jurado, J., Martínez Corbella, M., Mulas, J., Rodríguez Ortiz, J.M. (2000). Establecimiento de un modelo geológico para el estudio de la subsidencia por rebajamiento del nivel freático. Geotemas, 1, 155-158.
- Rodríguez Ortiz, J.M., Mulas, J. (2002). Subsistencia generalizada en la ciudad de Murcia (España). In Ayala Carcedo, J. & Olcina Cantos Coords., Riesgos Naturales (pp. 459-463). Barcelona: Editorial Ariel.
- Sato, H.P., Abe, K., Ootaki, O. (2003). GPS-measured land subsidence in Ojiya City, Niigata Prefecture, Japan. Eng. Geol. 67, 379-390.
- Strozzi, T., Wegmüller, U. (1999). Land subsidence in Mexico City Mapped by ERS Differential SAR Interferometry. Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., IGARSS 1999, Piscataway, New Jersey, 28 June-2 July, 4, 1940-1942.
- Tomás, R. (2009). Estudio de la subsidencia de la ciudad de Murcia mediante Interferometría SAR diferencial (DInSAR) avanzada. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.
- Tomás, R., Lopez-Sanchez, J.M., Delgado, J. (2005.a). Técnicas de ingeniería cartográfica empleadas en el estudio de subsidencia y movimientos de ladera: principales características y análisis comparativo. CD Proceedings. XVII Ingegraf-XV ADM internacional Congreso. Sevilla, Spain.
- Tomás, R., Márquez, Y., Lopez-Sanchez, J.M., Delgado, J., Blanco, P., Mallorquí, J.J., Martínez, M., Herrera, G., Mulas, J. (2005b). Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. Remote Sensing of the Environment, 98, 269 - 283.
- Wang, C., Zhang, H., Liu, Z., Cheng, S., Lu, G. (2001). ERS differential SAR interferometry for urban subsidence monitoring of Suzhou, Eastern China. Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., IGARSS 2001, Sidney, 9-13 July, 7, 3249-3251.
- Wegmüller, U., Strozzi, T., Bitelli, G. (1999). Validation of ERS differential SAR interferometry for land subsidence mapping: the Bologna Case study. Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., IGARSS 1999, Piscataway, New Jersey, 28 June-2 July, 2, 1131-1133.
- Wiesmann, A., Wegmüller, U., Werner, C., Strozzi, T. (2003). Subsidence monitoring over oil fields with L-band SAR interferometry. Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., IGARSS 2003, Toulouse, 21-25 July, 3, 1546 - 1548.
- Yonezawa, C., Takeuchi, S. (2000). Land subsidence detection using long interval ERS/SAR data pairs. Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., IGARSS 2000, Hawaii, 24-28 July, 4, 1539 - 1541.