

DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE DEFORMACIONES EN REGIONES AMPLIAS

Biescas E. ⁽¹⁾, Herrera G. ⁽²⁾, Fradua I. ⁽¹⁾, Crosetto M. ⁽¹⁾, Crippa B. ⁽³⁾

⁽¹⁾ Instituto de Geomática, Av. Canal Olímpic s/n, 08860 Castelldefels, España, erlinda.biescas@ideg.es

⁽²⁾ Instituto Geológico y Minero de España, C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España, g.herrera@igme.es

⁽³⁾ Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Milán, Via Cicognara 7, Milán, Italia, bruno.crippa@unimi.it

Palabras clave: Teledetección, SAR, DInSAR, macro-análisis, subsidencia, análisis errores.

Resumen

El artículo describe la detección y análisis de los movimientos del terreno en zonas extensas usando la interferometría diferencial SAR (DInSAR). La detección de movimientos y deformaciones de la superficie terrestre representa una importante fuente de información para la toma de decisiones en zonas de riesgo. DInSAR es una técnica basada en datos satélite que permite medir deformaciones en áreas muy extensas. En la primera parte de este artículo se describe el proceso DInSAR, necesario para realizar un análisis de bajo coste de deformaciones en regiones amplias. Este tipo de análisis viene indicado con el término “macro-análisis”. En la segunda parte se muestran dos aplicaciones del método descrito: la detección de fenómenos de deformación no conocidos en una zona de Cataluña y en la región de Murcia. En la descripción de las dos aplicaciones se ilustran las ventajas y limitaciones del método.

1. Introducción

Los sensores “Radar de Apertura Sintética” o SAR (*Synthetic Aperture Radar*) transportados en plataformas satélite, proporcionan imágenes de tipo radar de áreas extensas con una elevada resolución espacial, razón por la cual son los sensores radar más usados en teledetección. La Interferometría SAR (InSAR) es una técnica basada en el tratamiento conjunto de imágenes SAR de una misma zona, obtenidas desde posiciones ligeramente diferentes, cuya principal aplicación es la obtención de Modelos Numéricos del Terreno, MNT, [1, 2]. La Interferometría SAR diferencial (DInSAR) es una técnica interferométrica que permite detectar, en áreas extensas, deformaciones de hasta unos pocos milímetros de la superficie del terreno [3]. Esta técnica se ha empleado con éxito para el estudio de movimientos de glaciares, deformaciones debidas a la actividad sismo-volcánica, subsidencias en áreas urbanas y otras aplicaciones [4, 5, 6]. La técnica se basa en el análisis de un conjunto de imágenes SAR correspondientes a un intervalo de tiempo concreto, que incluye el fenómeno de la deformación objeto del estudio. El resultado del procesado DInSAR es un mapa de las deformaciones que ha sufrido el área de estudio a lo largo del intervalo de tiempo elegido. Las ventajas y limitaciones de DInSAR como técnica de monitorización de subsidencias han sido analizadas en estudios a escala real llevados a cabo por diversos institutos, organizaciones y universidades [2, 7]. Los resultados más favorables se han obtenido en zonas urbanas, donde la calidad de las observaciones radar se conserva sobre largos periodos de tiempo, véanse [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Un enlace interesante a los últimos resultados basados en datos ERS y Envisat es <http://eopi.esa.int/esa/esa>.

El valor de la técnica DInSAR se debe a varios aspectos fundamentales: las grandes dimensiones de las áreas cubiertas por las imágenes SAR y su alta resolución espacial, así como la disponibilidad de un archivo histórico de imágenes SAR desde 1991, de los Satélites de observación Remota Europeos ERS-1 y 2. Como se discute posteriormente en este documento, estas dos características hacen posible dos tipos de análisis DInSAR: un análisis “macro” de grandes áreas, por ejemplo 100 por 100 km², y un análisis en detalle de fenómenos de deformación concretos, por ejemplo subsidencias de 100 por 100 m².

El primer aspecto, permite, mediante la técnica DInSAR, medir deformaciones del terreno asociadas a distintos tipos de fenómenos geofísicos que afectan a grandes áreas, por ejemplo deformaciones originadas por un sismo [14, 15, 16], actividad volcánica [9] y movimientos de glaciares [17, 18]. Además estos fenómenos son estudiados con una alta resolución espacial proporcionada por la alta resolución de las imágenes de satélite SAR. Por ejemplo, los ERS cubren áreas de 100 por 100 km² siendo la dimensión de cada píxel de la imagen de 4 por 20 m². El segundo aspecto, la disponibilidad de imágenes SAR en el tiempo, es fundamental para monitorizar deformaciones lentas, por ejemplo subsidencias con velocidades de deformación de algunos milímetros año. Si además, se utiliza un conjunto numeroso de imágenes SAR que cubran la misma área de estudio, se puede conseguir una medida precisa y una descripción exacta de la evolución temporal de la deformación del terreno. Para poder realizar este

tipo de análisis es necesario que las imágenes sean coherentes durante todo el intervalo de tiempo estudiado. Esta condición normalmente se cumple en el medio urbano, periurbano e industrial.

En este artículo se propone una técnica que permite el análisis de deformaciones a dos niveles: detección temprana en grandes áreas y un análisis en detalle a nivel local. El primer nivel, que se describe en este artículo y que llamaremos macro-análisis, consiste en un análisis de bajo coste, cuyo objetivo principal es detectar las subsidencias ocurridas en el intervalo de tiempo considerado. La característica principal en este nivel es la detección de subsidencias desconocidas aprovechando la gran extensión cubierta por las imágenes SAR. Por lo tanto, para esta técnica aprovechamos dos características importantes del DInSAR: la cobertura espacial de regiones amplias y el acceso a un estudio histórico usando imágenes adquiridas desde 1991. Esto debe de ser un análisis de bajo coste, es decir tiene que ser realizado con un conjunto de imágenes SAR limitado. A este primer nivel le puede seguir un análisis en detalle a nivel local, basado en un conjunto de imágenes SAR numeroso, en aquellas zonas con subsidencias significativas y de interés en la ordenación y la planificación del territorio.

En las próximas secciones se describe la estrategia usada en el Instituto de Geomática para estimar las deformaciones del terreno a partir de una serie de imágenes SAR con un estudio de bajo coste usado para detectar deformaciones desconocidas, bautizado como macro-análisis. En la segunda parte del artículo se describen dos ejemplos de macro-análisis. El primero sobre una área de Cataluña, donde se obtuvieron resultados positivos, pues se localizaron varias zonas de subsidencia de las que no se tenía conocimiento. El segundo ejemplo sobre una área de la región de Murcia sobre la que se confirmó la estabilidad del terreno en el intervalo de tiempo estudiado.

2. Macro-análisis

El análisis DInSAR en detalle de fenómenos locales, utiliza un conjunto de imágenes SAR numeroso y exige importantes recursos económicos y computacionales para la adquisición de imágenes y el procesado de datos. Sin embargo el macro-análisis de bajo coste, utiliza un conjunto de imágenes SAR reducido, que permite detectar subsidencias desconocidas en áreas extensas, minimizando los recursos necesarios. Hay que indicar que con este tipo de análisis, no todas las deformaciones serán detectadas: la magnitud mínima de la deformación para ser detectada dependerá de muchos factores como el número de imágenes disponibles, la evolución temporal y espacial de la deformación, la coherencia de las imágenes SAR en el área de interés, etc. El macro-análisis de bajo coste se basa en un proceso DInSAR flexible, cuyas características principales se detallan a continuación. Un esquema general del proceso se ilustra en la Figura 1.

- **Selección de las imágenes.** Como ya se ha mencionado con anterioridad, el macro-análisis de bajo coste tiene que realizarse con un número limitado de imágenes. El número exacto de imágenes necesarias dependerá directamente del contexto de análisis, es decir, de factores como la magnitud, dimensión espacial y evolución temporal de las deformaciones a detectar. Por ejemplo, para deformaciones lentas, activas a lo largo de varios años, conviene elegir interferogramas que correspondan a un intervalo de tiempo de al menos dos años.
- **Corregistraçión.** Esta etapa es necesaria para que todas las imágenes tengan la misma geometría. A partir de las imágenes corregistradas es posible calcular la amplitud media, m_A , usada para visualizar los resultados.
- **Cálculo interferométrico.** Esta etapa incluye dos fases:
 - a. El cálculo del interferograma complejo a partir de dos imágenes, efectuado multiplicando la primera imagen (*master*) por el complejo conjugado de la segunda (*slave*).
 - b. La simulación del interferograma sintético está basada en un MNT de la zona considerada. La fase interferométrica diferencial (es decir, la fase DInSAR), que contiene la información relacionada con las deformaciones, es calculada por la sustracción del interferograma simulado a partir del interferograma real.
- **Cálculo de la imagen de coherencia.** La coherencia es la correlación de la *master* y de la *slave* y representa un dato fundamental para la interpretación de los resultados, ya que indica, para cada píxel, la calidad de su fase interferométrica. Además, es un parámetro fundamental para la siguiente etapa: el desarrollo de la fase DInSAR.
- **Unwrapping (desarrollado de fase).** El unwrapping consiste en la reconstrucción de la fase interferométrica, que es conocida en “módulo 2π ”, es decir que se conoce menos un número entero de ciclos 2π . En este proceso se ha usado una implementación del método de Mínimo Coste de Flujo [19, 20]. Este método funciona en redes irregulares de píxeles, es decir, se realiza el *unwrapping* únicamente en aquellos píxeles donde la coherencia supere un umbral determinado. Un aspecto especialmente crítico del *unwrapping* es su funcionamiento en las zonas de baja coherencia, donde el ruido asociado a la fase interferométrica es muy alto.

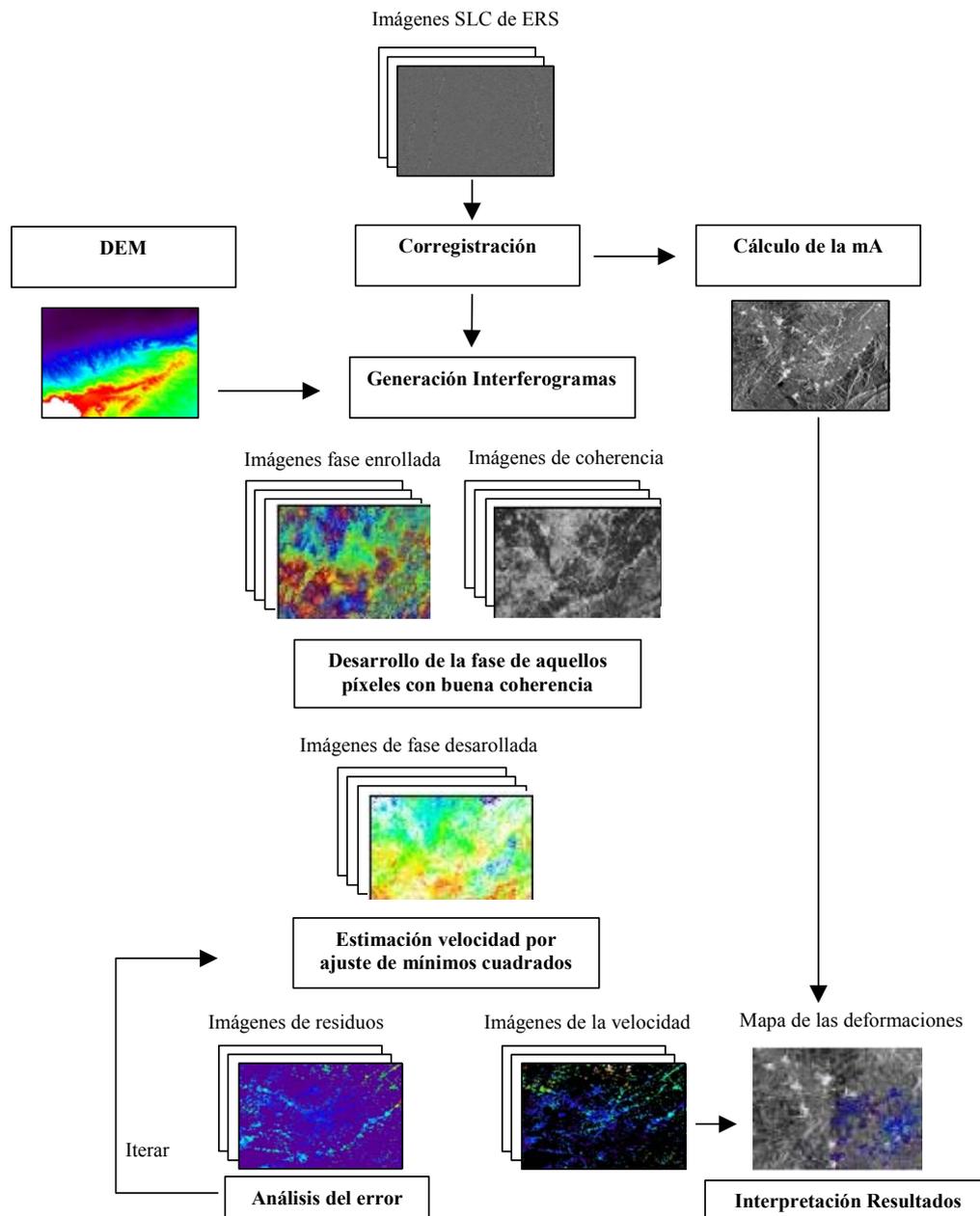


Figura 1: Esquema del procedimiento DInSAR basado en múltiples interferogramas, que pueden soportar un macro-análisis y un análisis en profundidad de deformaciones del terreno.

- Estimación del mapa de velocidades de deformación.** Con el objetivo de estimar un campo de deformaciones a partir de las observaciones DInSAR, se usa un modelo que permite aproximar la velocidad de la deformación en cada píxel mediante una función lineal, obtenida usando un ajuste de Mínimos Cuadrados. El procedimiento de Mínimos Cuadrados incluye una re-selección de observaciones a partir del criterio de Baarda [21], muy útil para la detección de errores propios del *unwrapping*. Las salidas de este procedimiento incluyen el campo de velocidad compensado, los correspondientes campos de calidad, y los campos de residuos (diferencia entre los valores de fase observados y los compensados). Destacamos que en el caso del macro-análisis, sólo se estima un campo de velocidad: en el análisis profundo se pueden considerar diferentes intervalos temporales y consecuentemente estimar un campo de velocidad para cada uno de estos intervalos. Los residuos se usan para detectar los errores asociados a los interferogramas desarrollados (es decir, las observaciones de entrada), como los errores asociados al *unwrapping*, los efectos atmosféricos, etc. Con el objetivo de estimar mejor los campos de velocidad compensados, el procedimiento funciona de manera iterativa, corrigiendo los pesos de las observaciones o eliminando algunas de ellas.

- **Interpretación de datos.** El campo de velocidad estimado es la principal salida del análisis de datos y de la interpretación. Este paso debe incluir un análisis detallado de los errores obtenidos en la estimación del mapa de velocidades de deformación, principalmente enfocado en las áreas de interés, por ejemplo, en aquellas áreas donde se haya observado un fenómeno de deformación. El resultado de este paso es un mapa con todas las nuevas áreas con movimiento detectadas y con su velocidad media de deformación estimada.

Si es necesario, el macro-análisis puede ir seguido de un estudio en profundidad de las áreas de interés. Opcionalmente se puede geocodificar alguna zona de interés de los mapas de velocidad obtenidos, con la finalidad de facilitar la interpretación de los resultados y concretar la ubicación de los mismos.

3. Resultados

El procedimiento descrito anteriormente puede ser usado en diferentes contextos. En esta sección se presentan dos ejemplos de este macro-análisis, sobre áreas extensas y usando pocas imágenes SAR, con un contexto histórico de hasta hace 10 años. En estos resultados hay que destacar la rápida y poco costosa detección de deformaciones desconocidas, y el carácter cualitativo de las deformaciones estimadas. En primer lugar se comentan los resultados obtenidos sobre la comarca del Vallés y alrededores, en Cataluña. Éstos presentan la detección de varios núcleos de deformación desconocidos hasta el momento. En segundo lugar se describen los resultados obtenidos sobre la región de Murcia, donde se observó una estabilidad del terreno en el intervalo temporal estudiado.

3.1 Resultados sobre Cataluña

El proceso de macro-análisis descrito ha sido usado sobre una área de unos 340 km², localizada en los alrededores de Barcelona, en las dos comarcas del Vallés. A priori no se disponía de ninguna información sobre deformaciones ocurridas en esta zona. Con este ejemplo se muestra la eficacia del método de macro-análisis sobre áreas extensas usando un número limitado de imágenes SAR. En esta aplicación el objetivo es enfatizar la rápida detección de deformaciones desconocidas, y no dar una estimación cuantitativa de estas deformaciones. Es por esta razón que se han usado conjuntos de datos SAR limitados.

Este macro-análisis se basa en 10 interferogramas, elaborados a partir de 13 imágenes SAR de ERS ascendentes y usando un buen MNT derivado en el Instituto Cartográfico de Cataluña en el proceso de generación de cartografía a escala 1:5000. Estas imágenes cubren más de 5 años, desde Junio de 1995 a Agosto de 2000. Los interferogramas tienen diferentes valores de base temporal (el intervalo de tiempo entre las adquisiciones de las dos imágenes que forman el interferograma), entre 630 y 1750 días. El área de trabajo se muestra en la Figura 2, donde el campo de velocidad de deformación resultante se superpone a una imagen de amplitud SAR (se trata de la mA obtenida a partir de las 13 imágenes SAR disponibles). Tal y como era de esperar, la mayor parte de la región muestra estabilidad. Sin embargo, hay una área relativamente grande, de unos 4 km², sobre la que se observa una deformación de hasta 5mm/año, y otras áreas más pequeñas que muestran deformaciones de hasta 10 mm/año. Hay que recordar que esto sólo representa una primera detección de las subsidencias, y que para conocer cuantitativamente los fenómenos es necesario un estudio DInSAR más profundo [22]. De todas maneras, este ejemplo muestra la potencialidad del DInSAR como herramienta de rápida detección de deformaciones del terreno.

3.2 Resultados sobre la región de Murcia

En la ciudad de Murcia se han verificado unos fenómenos de deformación del terreno en un periodo de aproximadamente 6 años, del 1992 al 1998. Los asentamientos producidos en la región de Murcia han sido estudiados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en colaboración con la Consejería de Turismo y Ordenación del Territorio desde 1999 [23, 24, 25, 26, 27]. El Área Metropolitana de Murcia se emplaza en el Sureste de España sobre un relleno aluvial cuaternario perteneciente a la cuenca sedimentaria que cubre el corredor de desgarré Guadaletín-Segura. El subsuelo alberga un importante acuífero denominado Sistema Acuífero de la Vega Media del Segura con una extensión de 206 km². La sequía producida entre 1992 y 1996 y el consecuente aumento de pozos construidos para irrigación fueron las causas principales de una bajada media de 7m del nivel freático en el acuífero, con picos de hasta 16m. Esto produjo una subsidencia que a pesar de ser moderada, ocasionó desperfectos valorados en 50 millones de euros y una gran alarma social. Las campañas de investigación geotécnica y la modelización numérica llevada a cabo por el IGME en el área metropolitana, han permitido calcular la respuesta geotécnica del terreno frente las variaciones del nivel freático del acuífero. Los resultados teóricos obtenidos, para un descenso del nivel freático de 10m, oscilan entre 2-4 cm pudiendo llegar a 8 cm, con asientos máximos de hasta 12 cm para un descenso teórico del nivel freático de 25m.

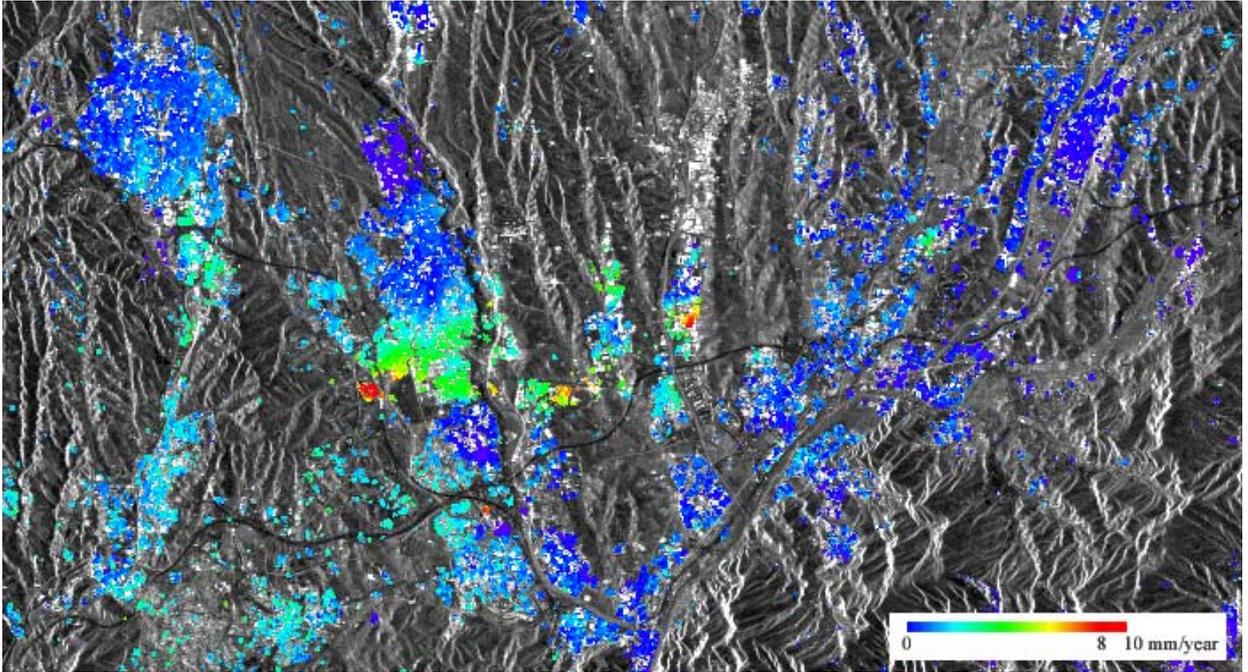


Figura 2: Resultado del macro-análisis sobre una área de 28 por 12 km² basada en 10 interferogramas. El campo de velocidad de deformación, estimado entre Junio de 1995 y Agosto de 2000, es sobrepuesto a una amplitud SAR de la misma área. El píxel tiene un tamaño de 40 por 40 m², ya que se ha usado una compresión de 10 por 2.

La falta de medidas reales de subsidencia en la región para dicho periodo impide validar este modelo, aunque los resultados parecen estar en consonancia con la mayoría de los asentamientos registrados en edificaciones, siendo las más antiguas y con cimentaciones superficiales las que han sufrido daños más importantes. Desde el año 2000, el Instituto Geológico y Minero de España y la Consejería de Turismo y Ordenación del Territorio, vienen controlando instrumentalmente los asentamientos mediante 628 hitos topográficos y 22 sondeos con extensómetro.

En este caso, el proceso de macro-análisis ha sido usado para el estudio de la región de Murcia, en concreto, de una área de aproximadamente unos 100 por 100 km², cuya extensión puede verse en la Figura 3. El estudio se basa en una serie de imágenes SAR descendentes que cubre de Agosto de 1995 a Diciembre de 1999. Para el estudio de una área extensa mediante macro-análisis se recomienda encarecidamente utilizar un MNT de alta resolución de la zona. El primer macro-análisis realizado de la región de Murcia ha sido llevado a cabo usando un MNT con resolución 1 km de distribución gratuita. Este MNT está afectado por muchos errores dada su baja resolución. De este modo la interpretación de la fase interferométrica se hace altamente compleja, pues es difícil distinguir entre las franjas debidas al error topográfico y las debidas a deformaciones del terreno. La única manera de distinguir ambas contribuciones es explotando la relación entre el signo de la base perpendicular asociada a cada interferograma y la representación de la fase topográfica, y la relación entre el intervalo temporal asociado a cada interferograma y la representación de la fase de movimiento. Un ejemplo de la primera relación puede verse en la Figura 4. Además el exceso de error topográfico puede provocar errores en el desarrollo de la fase, dificultando más la interpretación de los datos.

La escasez de zonas urbanas en el área de estudio provoca una coherencia global baja. Al haber poca coherencia el desarrollo de la fase (*unwrapping*) se hace complejo y suele contener errores que se extienden a lo largo de la zona de manera acumulativa. Para evitar este efecto, y dado que el error de *unwrapping* siempre es relativo a una área determinada, la solución óptima es definir varias zonas separadas y a cada una asignarle una zona estable, que se considerará con deformación y con error topográfico nulos. El resto de la zona se estudia en relación a esta zona considerada como estable. De esta manera han sido estudiadas por separado un total de 58 zonas repartidas por toda la región, cada una con una zona estable. El criterio para elegir estas zonas se ha basado en la topografía del terreno. Como muestra de los resultados obtenidos en este macro-análisis de la región de Murcia puede verse la Figura 5. En esta figura vemos el campo de deformación obtenido sobre la misma ciudad de Murcia y alrededores, sobrepuesto a una imagen de amplitud de la misma zona. Para la obtención de este mapa se han usado dos zonas separadas, una cubriendo la ciudad y el área de la izquierda y otra cubriendo la parte norte del área urbana principal. Estos resultados corresponden al periodo de Agosto de 1995 a Diciembre de 1999. En la zona mostrada se observa estabilidad durante este periodo.



Figura 3: Media de amplitudes de la región de Murcia y alrededores, realizada a partir de 24 imágenes SLC. La imagen abarca una superficie de 104 por 98 km². El píxel tiene un tamaño de 80 por 80 m², ya que se ha usado una compresión de 20 por 4. En la parte central inferior de la imagen destaca la ciudad de Murcia.

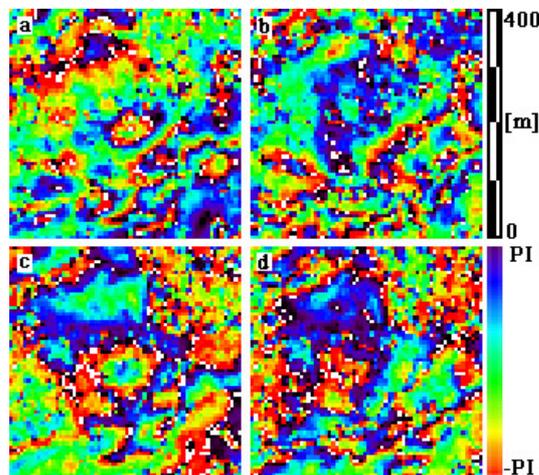


Figura 4: Efecto del error topográfico del MNT en los interferogramas. En la elaboración de la fase interferométrica diferencial es muy importante la calidad del MNT usado. En esta Figura se reflejan los diferentes efectos que pueden provocar los errores del MNT. Para la elaboración de las fases interferométricas (a) y (b) ha sido usado un MNT con espaciado 1 km, es decir, con muy poca resolución. En el caso de las imágenes (c) y (d) ha sido utilizado un MNT con espaciado 100 m, que tiene por lo tanto menor error que el anterior. Las fases interferométricas (a) y (c) corresponden a un interferograma con base perpendicular 63.8 m y una altura de ambigüedad (es la diferencia en cota que genera una diferencia de fase de 2π) de 130 m aprox., mientras que (b) y (d) corresponden a un interferograma con base perpendicular 43.6 m y una altura de ambigüedad de 210 m aprox. De esta manera puede observarse que la fase interferométrica donde más se refleja el error topográfico es la correspondiente a (a), en la que cada franja representa un error del MNT de unos 130 m.

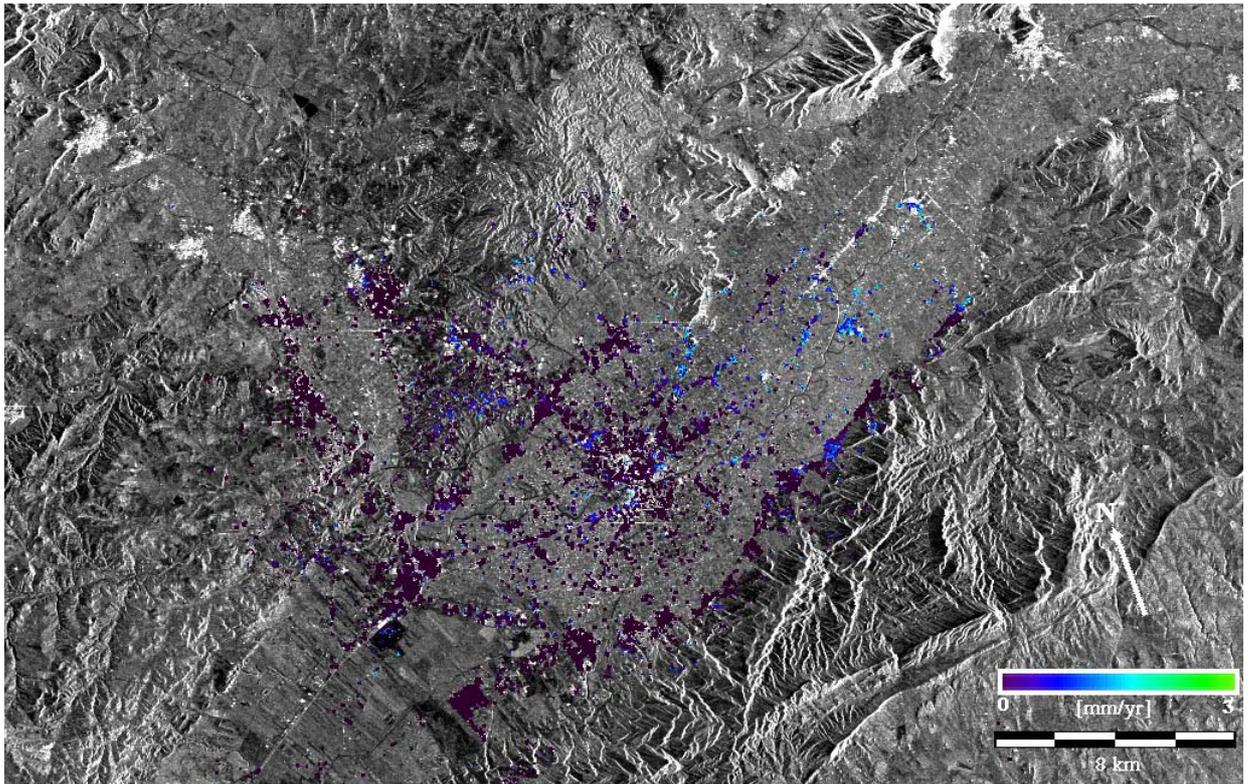


Figura 5: Resultado del macro-análisis sobre una área de 41 por 26 km², donde se observa la estabilidad de la zona del río Segura, en los alrededores de la ciudad de Murcia. El campo de velocidad de deformación, estimado entre Agosto de 1995 y Diciembre de 1999, se ha sobrepuesto a una imagen de amplitud SAR de la misma área. El píxel tiene un tamaño de 40 por 40 m², ya que se ha usado una compresión de 10 por 2. El resultado ha sido obtenido a partir del estudio de dos zonas separadas cada una con una zona estable, con la finalidad de evitar errores de *unwrapping*. El mapa de cada una de las zonas ha sido elaborado a partir de 20 interferogramas y de 6 interferogramas ERS descendentes respectivamente. Se observa una estabilidad global.

4. Conclusiones

La técnica DInSAR proporciona medidas de deformaciones con una calidad que puede ser comparable a la de las técnicas tradicionales de geodesia. Sin embargo esta calidad requiere un elevado número de imágenes SAR y métodos avanzados de análisis de datos. Esto exige importantes recursos económicos y computacionales para la adquisición de imágenes y el procesado de datos. En este artículo se proponen un análisis de deformaciones de bajo coste que funciona sobre regiones amplias (macro-análisis). El macro-análisis utiliza un conjunto de imágenes SAR reducido, que permite detectar subsidencias desconocidas en áreas extensas minimizando los recursos necesarios.

Se han descrito dos ejemplos de macro-análisis, uno sobre Cataluña y otro sobre la región de Murcia. En estos ejemplos se refleja la validez del macro-análisis para detectar zonas afectadas por subsidencias sin previo conocimiento, a la vez que se demuestra la eficacia de la separación en zonas del área de estudio para evitar la propagación de errores de desarrollo de fase. En el estudio sobre Cataluña se han detectado varias deformaciones de hasta 10 mm/año usando 10 interferogramas, elaborados a partir de 13 imágenes SAR de ERS ascendentes. En el caso de la región de Murcia se observa estabilidad del terreno en el periodo temporal de Agosto de 1995 a Diciembre de 1999.

Agradecimientos

Una parte de este trabajo ha sido financiada por el Ministerio de Educación y Ciencia, mediante el proyecto del Programa Nacional de Recursos Naturales AURORAE (Aplicaciones de la teledetección para la gestión de recursos naturales), bajo el contrato número REN2003-00742, y mediante la Acción Integrada entre el Instituto de Geomática y la Università degli Studi di Milano, referencia HI2002-0029.

Referencias

- [1]. Bamler, R. y Hartl, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry, *Inverse Problems*, 14:R1–R54.
- [2]. Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodríguez, E., Goldstein, R.M., 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88 (3), 333-382.
- [3]. Agudo, M., Biescas, E., Monserrat, O., Martínez, J., Crosetto, M., Herrera, G., 2005. ¿Cómo medir las deformaciones del terreno con teledetección radar?. 6ª Semana Geomática, Barcelona, 8-11 Febrero 2005.
- [4]. Perski, Z., Jura, D., 2003. Identification and measurement of mining subsidence with SAR interferometry potentials and limitations. *Proceedings of the 11th FIG Symposium on Deformation Measurement*, Santorini, Grecia. <http://www.fig.net/commission6/santorini/C-INSAR/C6.pdf>
- [5]. 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 (10), 2573-2585.
- [6]. Amelung, F., Jonsen, S., Zebker, H.A., Segall, P., 2000. Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galápagos volcanoes observed with radar interferometry. *Nature*, 407, 993-996.
- [7]. Crosetto M., 2004. Deformation measurement using interferometric SAR data. Submitted to *ISPRS Journal*.
- [8]. Yonezawa, C., Takeuchi, S., 2000. Land subsidence detection using long interval ERS/SAR data pairs. *Proc. of IGARSS'00*. Hawaii. USA.
- [9]. Hoffmann, J., Zebker, H.A., Galloway, D.L., Amelung, F., 2001. Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by SAR interferometry. *Water Resources Research*, 37 (6), 1551-1566.
- [10]. Wicks, C., Thatcher, W., Monastero, F., Hasting, M., 2001. Steady-state deformation of the Coso Range, East-Central California, inferred from satellite radar interferometry. *J. of Geophys. Res.*, 106 (B7), 13769-13780.
- [11]. Crosetto, M., Castillo, M., Arbiol, R., 2003. Urban subsidence monitoring using radar interferometry: Algorithms and validation. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 69 (7), 775–783.
- [12]. Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J.J., Berardino, P., Sansosti, E., 2004. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 42 (7), 1377-1386.
- [13]. Hanssen, R., 2001. *Radar interferometry*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland, 308p.
- [14]. Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl K., Rabaute, T., 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364, 138-142.
- [15]. Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M., Adragna, F., 1994. Radar interferometry mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. *Nature*, 369, 227-230.
- [16]. Massonnet, D., Briole, P., Arnaud, A., 1995. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, 375, 567-570.
- [17]. Goldstein, R.M., Englehardt, H., Kamb, B., Frolich, R.M., 1993. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream. *Science*, 262, 1525-1530.
- [18]. Kwok, R., Fahnestock, M.A., 1996. Ice sheet motion and topography from radar interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 34 (1), 189-200.
- [19]. Costantini, M., 1998. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36 (3), 813-821.
- [20]. Costantini, M., Farina, A., Zirilli, F., 1999. A fast phase unwrapping algorithm for SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 37 (1), 452-460.
- [21]. Baarda, W., 1968. A testing procedure for use in geodetic networks. *Netherlands Geodetic Commission – Publications on Geodesy*, 2 (5), Delft (Holland).
- [22]. Crosetto M., Crippa B., Biescas E., 2004. Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. *Engineering Geology*. In press.
- [23]. Martínez, M. et al., 2004. Efectos de una subsidencia moderada por extracción de agua subterránea en Murcia. España. XXXIII IAH&7º Congress ALHSUD Groundwater Flow Understanding from Local to Regional Scales, Zacatecas, México 2004. ISBN: 970-32-1749-4.
- [24]. Aragon, R. et al., 2004. Impacto de la explotación intensiva de aguas subterráneas en la ciudad de Murcia (España). Análisis hidrogeológico. XXXIII IAH&7º Congress ALHSUD Groundwater Flow Understanding from Local to Regional Scales, Zacatecas, México. ISBN: 970-32-1749-4.
- [25]. Mulas, J et al., 2003. Geotechnical and hydrogeological analysis of land subsidence in Murcia (Spain). *International Conference on Groundwater in Geological Engineering*. Bled (Slovenia). Petic M., Pexdic, J., Treck, B., Veselic, M. (eds) RMZ. Materials and Geoenvironment. *Groundwater in Geological Engineering*. Vol 50, No.1. pp.249-252. Ljubljana, Slovenia.
- [26]. IGME, 2000. Estudio Geotécnico para el análisis, prevención y corrección de la patología derivada de los cambios en el subsuelo de la Ciudad de Murcia. Informe inédito.
- [27]. IGME, 2001. Estudio Geotécnico del subsuelo del Área Metropolitana de Murcia. Análisis de la subsidencia por descenso del nivel freático. Modelos geotécnicos del terreno y diagnosis del problema. Informe inédito.