

## MONITORIZACIÓN DE SUBSIDENCIA DESDE SATÉLITE MEDIANTE TÉCNICAS INTERFEROMÉTRICAS DIFERENCIALES

O. MORA y J. J. MALLORQUÍ

omora@tsc.upc.es

*Dept. de Teoria del Senyal i Comunicacions (TSC). Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).  
C/ Jordi Girona 1-3, Mòdul D-3. 08034 Barcelona.*

**RESUMEN:** Las técnicas interferométricas aplicadas sobre imágenes SAR (Radar de Apertura Sintética), captadas desde plataformas orbitales o aerotransportadas, han demostrado su capacidad para generar DEM's (Mapas Digitales de Elevación) de alta calidad. Sin embargo, esta metodología se puede extender para la teledetección de movimientos terrestres (terremotos, subsidencia, etc.), derivando en las técnicas interferométricas diferenciales. En este artículo se describe todo el proceso de obtención de un mapa de movimiento para una zona con velocidad de subsidencia lenta, utilizando imágenes SAR captadas por los satélites ERS-1/2 con una separación temporal de hasta casi 4 años.

**ABSTRACT:** The interferometric techniques using SAR (Synthetic Aperture Radar) images, obtained from orbital or airborne platforms, have demonstrated their ability to generate high quality DEM's (Digital Elevation Maps). Nevertheless, this methodology can be modified for the detection of terrestrial displacements (earthquakes, subsidence, etc.), into what it is known as differential interferometry. In this paper, the generation of a displacement map of an area with low subsidence velocity is presented, using SAR images obtained by ERS-1/2 satellites with a temporal separation up to 4 years.

**Palabras clave:** subsidencia, interferometría, SAR, ERS, satélite

### INTRODUCCIÓN

Uno de los procesos terrestres más interesantes de monitorizar es el desplazamiento de la capa superficial terrestre. Este movimiento puede ser provocado por un fenómeno de alta velocidad, como un terremoto o la entrada en erupción de un volcán, o por un proceso de mayor lentitud, como los efectos de subsidencia producidos por una explotación minera. En estos casos, el principal objetivo reside en la capacidad de generar el mapa de movimiento de toda la zona para ser capaces de evaluar cómo y porqué se ha producido dicha subsidencia.

En este artículo presentamos la aplicación de las técnicas interferométricas diferenciales para la creación de mapas de subsidencia. El proceso se basa en la obtención de dos imágenes SAR de la zona bajo estudio, en este artículo de los satélites ERS-1/2 de la ESA (Agencia Espacial Europea), en instantes temporales diferentes. Una vez corregistradas dichas imágenes, se puede generar el interferograma, que es el resultado de multiplicar una de las imágenes por el conjugado de la otra (ambas imágenes son complejas) (Rocca 1997). La fase resultante de este proceso contiene información de la

topografía de la zona iluminada por los satélites, y si se ha producido algún tipo de movimiento entre las adquisiciones también tendrá una componente asociada al desplazamiento. Por lo tanto, el objetivo será realizar un procesado eficiente del interferograma de forma que se extraiga la información de movimiento eliminando la información de la topografía.

Todo este proceso se divide en varias etapas que van desde el recorte y alineamiento de las imágenes SAR iniciales, hasta el filtrado y georeferenciación de la información final. Los datos utilizados en este estudio se corresponden con imágenes SAR de una zona afectada por explotaciones mineras, lo que implica movimientos de velocidad lenta. Por lo tanto, la separación temporal entre adquisiciones tendrá que ser alta, en este caso desde 1 hasta casi 4 años.

### SELECCIÓN DE IMÁGENES

El primer parámetro a considerar es la coherencia de las imágenes iniciales. Esta coherencia nos indica la calidad de la fase (información) obtenida, y dependerá de la separación temporal entre adquisiciones y de la

separación espacial de los satélites en cada una de las pasadas, denominada línea de base. Contra menor sean las separaciones temporal y espacial entre adquisiciones mayor será la coherencia. De todos modos, la separación temporal está determinada por el fenómeno a estudiar (Usai *et alii.* 2000), de manera que sólo podremos controlar el valor de la línea de base. En la Tabla 1 se presenta la información de los diferentes pares utilizados junto al valor de la línea de base, que como se puede observar, se han escogido del valor más pequeño posible.

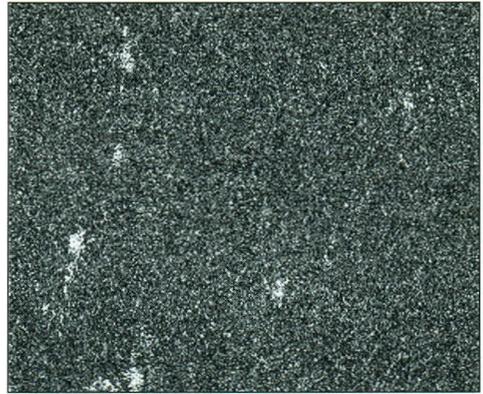
Imágenes	Línea de base
01 Noviembre 95	
27 Julio 99	-6 metros
13 Junio 95	
18 Febrero 98	-39 metros
29 Enero 97	
29 Abril 98	8 metros
31 Octubre 95	
27 Julio 99	-107 metros

**Tabla 1.** Selección de los pares de imágenes SAR.

### GENERACIÓN DE INTERFEROGRAMAS

Una vez escogidas las combinaciones de imágenes, se pueden generar los interferogramas multiplicando una de las imágenes por el conjugado de la otra. De este modo, se obtiene la diferencia de fases, que se corresponde con la diferencia de caminos recorridos por los pulsos electromagnéticos emitidos en cada órbita (Rocca, 1997). Para ello, se han de recortar y alinear a nivel de subpíxel las dos imágenes, de forma que la información del terreno contenida en un mismo píxel sea común. Finalmente se ha de eliminar la componente de fase sistemática denominada "tierra plana", que se corresponde con la distancia perpendicular del satélite a cada uno de los píxeles, y que no contiene información útil.

En la Figura 1 se presenta la imagen de coherencia calculada a partir del interferograma obtenido con las imágenes de línea de base menor (01NOV95-27JUL99). A partir de este momento las imágenes presentadas serán las correspondientes a este par.



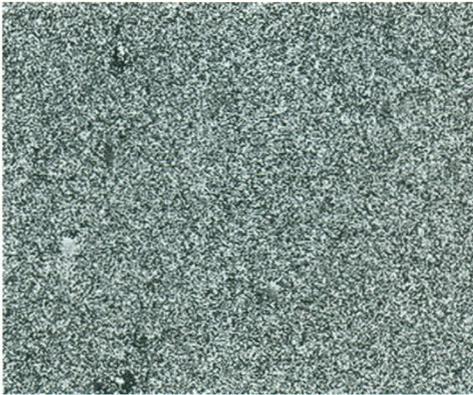
**Figura 1.** Coherencia.

Se pueden diferenciar perfectamente en la Figura 1 como las zonas pobladas presentan una coherencia elevada (blanco), mientras que las zonas de vegetación han perdido información (gris oscuro) debido a la gran separación temporal entre adquisiciones, en este caso 3,7 años. Por lo tanto, es de vital importancia utilizar una línea de base lo más corta posible que permita obtener la máxima calidad de fase posible. Afortunadamente, las zonas pobladas, que son las de mayor interés, presentan buena coherencia (Berardino *et alii.* 2000). Hay que tener en cuenta que subsidencias de unos centímetros pueden generar graves problemas en las construcciones.

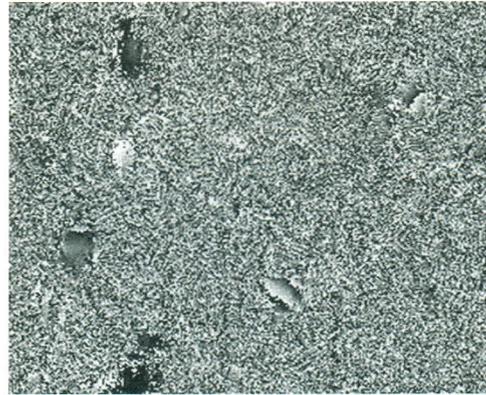
### PROMEDIADO COMPLEJO

La teledetección de movimientos de velocidad lenta obliga a trabajar con interferogramas de calidad muy baja, como se puede apreciar en la Figura 1. Por lo tanto es necesario aplicar técnicas que reduzcan el ruido asociado a la fase, por ejemplo mediante un promediado complejo de los píxeles del interferograma. La mejora en la calidad de la fase compensa la pérdida de resolución. En nuestro caso se ha realizado un promediado de bloques de 4x4 píxeles, lo que degrada la resolución en un factor 4.

En la Figura 2 se muestra la fase del interferograma resultante del promediado complejo. Como se puede apreciar, la fase es muy ruidosa, especialmente en las zonas no pobladas donde la coherencia es muy baja. En cambio, en las pequeñas poblaciones se pueden distinguir tendencias de fase más coherentes. En la siguiente fase del procesado se intentará mejorar la calidad en estas zonas.



**Figura 2.** Fase del interferograma promediado.



**Figura 3.** Fase del interferograma filtrado.

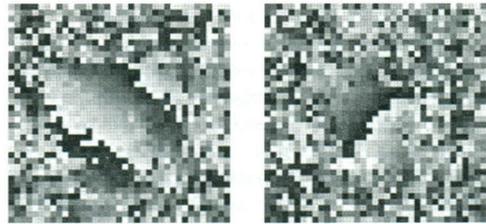
### FILTRADO Y ELIMINACIÓN DE TOPOGRAFÍA

En este punto se dispone de un interferograma cuya fase contiene información sobre la topografía de la zona y los posibles movimientos superficiales entre adquisiciones. De este modo, la siguiente tarea consistirá en la eliminación de la componente de fase debida a la topografía y la obtención de un mapa de fases de la mayor calidad posible. Pero antes es necesario realizar un filtrado del interferograma.

Para realizar el filtrado se ha optado por un filtro no lineal por bloques (Carrasco, 1998), que maximiza el valor complejo de los píxeles de calidad y no crea falsas franjas de fase en zonas de coherencia baja donde no hay información útil, consiguiendo mejorar la calidad de la fase sin alterar las zonas ruidosas.

Para restar los valores de fase asociados a la topografía se pueden utilizar dos opciones. Por un lado, si se dispone de un DEM de calidad media de la zona, se puede sintetizar el interferograma compuesto únicamente por la fase topográfica utilizando las órbitas conocidas de los satélites. Por otro lado, se puede utilizar un par de imágenes lo suficientemente cercanas en el tiempo, de forma que no se haya producido movimiento apreciable, y generar un mapa de fases topográfico para ser restado al que contiene movimiento y topografía. En nuestro caso se ha optado por este último método, con el par 31OCT95-01NOV95, al no disponer de un DEM de la zona. De todas formas, si se trabaja con líneas de base muy pequeñas, como es en este caso, la contribución de fase de la topografía es muy pequeña comparada con la asociada a los posibles movimientos, y se podría obviar este paso.

En la Figura 3 se puede apreciar el resultado obtenido. Comparando la Figura 2 con la Figura 3 se observa la gran mejora obtenida. La fase asociada a las poblaciones resulta mucho más nítida y se pueden ver algunas zonas interesantes, que están ampliadas en la Figura 4.



**Figura 4.** Ampliaciones del interferograma.

Como esta fase está asociada al movimiento, cambios en ella denotan movimientos en el terreno. Si no hubiese desplazamientos, la fase obtenida sería aproximadamente constante en cada una de las zonas urbanas, salvo el pequeño ruido asociado a las imprecisiones del sistema. De igual modo, la fase se presenta en un estado "enrollado", en intervalos que van de 0 a  $2\pi$ . Cada franja de fase (de negro a blanco) se corresponde con un desplazamiento de 2.8 centímetros en la dirección de visualización del satélite. Se observan dos pequeñas zonas en la imagen donde la fase realiza una excursión de aproximadamente un ciclo. Por lo tanto, este patrón puede ser asociado a movimientos sufridos en esas zonas durante el intervalo de adquisición de las imágenes SAR.

## GEORREFERENCIACIÓN

Evidentemente, esta información no es del todo útil hasta que no se sitúen los píxeles de la Figura 3 sobre coordenadas cartográficas, y se pueda identificar la posición de los movimientos con precisión. No hay que olvidar que la posición de los píxeles en el interferograma se corresponde con la geometría de las órbitas de los satélites, y no con un proyección cartográfica estándar.

Para ello, se ha reconstruido el DEM de la zona mediante el par de imágenes utilizadas para la generación de la componente de fase topográfica (Mora *et alii*. 1999). El mapa final de elevación en coordenadas UTM se presenta en la Figura 5, junto a la posición de las dos áreas urbanas afectadas de subsidencia.



Figura 5. Mapa georreferenciado de la zona.

Como se puede apreciar en la (Figura 5), una vez se tiene el mapa georreferenciado, ya se puede asociar a cada píxel del interferograma filtrado una posición cartográfica definida.

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente artículo hemos presentado el proceso de creación de mapas de movimiento mediante tecnología SAR orbital. Comenzando por la adquisición de las imágenes SAR y a través de una cadena de procesado se ha obtenido el mapa de desplazamiento de una zona real de test de gran complejidad, debido a la gran separación temporal entre las adquisiciones y a la única presencia de pequeñas zonas con calidad de fase apreciable, asociadas a áreas urbanas.

Con la geocodificación de los datos, se pueden asociar con gran exactitud los patrones de movimiento con su posición sobre el terreno, proporcionando un gran valor añadido a esta herramienta. No hay que olvidar que la única alternativa actual consiste en la medición DGPS de diversos puntos aislados sobre el terreno mediante campañas costosas y que no permiten cubrir de forma global grandes áreas.

Del mismo modo, cabe resaltar que estas técnicas de interferometría diferencial están todavía en evolución, y se tiene que trabajar en la mejora de la calidad de los mapas de subsidencia extrayendo el máximo de información posible de los interferogramas generados. La utilización de interferogramas de línea de base corta, como el aquí presentado, combinados con otras técnicas, como PS (Permanent Scatters) (Ferretti *et alii*. 2000), puede ser una forma de obtener un mayor número de píxeles de calidad, y permitir que se cubra la mayor extensión posible de terreno.

## BIBLIOGRAFÍA

- F. ROCCA, "An overview of ERS SAR interferometry", Proc 3<sup>rd</sup> ESA ERS Symposium, Florence, May 1997.
- S. USAI, E. SANSOSTI, P. BERARDINO, R. LANARI, G. FORNARO, M. TESAURO, P. LUNDGREN, "Modelling terrain deformations at the Phlegrean Fields with INSAR", IGARSS 2000, 24-28 July 2000, Honolulu, Hawaii.
- P. BERARDINO, G. FORNARO, G. FRANCESCHETTI, R. LANARI, E. SANSOSTI, M. TESAURO, "Subsidence Effects Inside the City of Napoli (Italy) Revealed by Differential SAR Interferometry", IGARSS 2000, 24-28 July 2000, Honolulu, Hawaii.
- D. CARRASCO, "Interferometry for Digital Elevation Model Generation and Differential applications". Tesis Doctoral, UPC, Barcelona 1998.
- O. MORA, O. AGUSTÍ, M. BARA, A. BROQUETAS, "Direct Geocoding for Generation of Precise Wide-Area Elevation Models with ERS SAR Data". Second International Workshop on ERS SAR Interferometry, FRINGE'99, Liege, November 1999.
- A. FERRETTI, C. PRATI, F. ROCCA, "Non-linear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry", IEEE TGARS, March 2000.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a *Institut Cartogràfic de Catalunya* (ICC) por haber proporcionado las imágenes utilizadas en este trabajo.