



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

⑪ Número de publicación: **2 355 340**

⑫ Número de solicitud: 201031149

⑬ Int. Cl.:  
**G01S 13/90** (2006.01)

⑭

SOLICITUD DE PATENTE

A1

②② Fecha de presentación: **26.07.2010**

④③ Fecha de publicación de la solicitud: **25.03.2011**

④③ Fecha de publicación del folleto de la solicitud:  
**25.03.2011**

⑦① Solicitante/s:  
**CONSORCI INSTITUT DE GEOMÀTICA**  
**Avda. Carl Friedrich Gauss, 11**  
**Parc Mediterrani de la Tecnologia**  
**08860 Castelldefels, Barcelona, ES**

⑦② Inventor/es: **Montserrat Hernández, Oriol y**  
**Crosetto, Michele**

⑦④ Agente: **Carpintero López, Mario**

⑤④ Título: **Método para monitorizar desplazamientos de terreno y de elementos creados por el hombre usando datos de radar de apertura sintética terrestre (GBSAR).**

⑤⑦ Resumen:

Método para monitorizar desplazamientos de terreno y de elementos creados por el hombre usando datos de radar de apertura sintética terrestre (GBSAR).

Un método para monitorizar desplazamientos de terreno y de elementos creados por el hombre que comprende preprocesar conjuntos de imágenes SAR complejas adquiridas en una primera campaña y en una campaña posterior por medio de un instrumento GBSAR para obtener una imagen SAR media incoherente para cada campaña; seleccionar, en cada una de las imágenes SAR medias incoherentes, píxeles que son representativos de objetivos respectivamente en cada uno de dichos conjuntos de datos de imágenes SAR, seleccionándose dichos objetivos de reflectores angulares artificiales, si los ha desplegados en el área de interés, y reflectores naturales en el área de interés;

realizar una correlación global de imágenes sobre los píxeles seleccionados para obtener un conjunto de pares de desviaciones globales expresadas en píxeles y seleccionar una pluralidad de pares de desviaciones globales con puntuación de calidad;

estimar efectos de reposicionamiento GBSAR obteniendo una máscara que comprende píxeles de área estable correspondientes a áreas estables en el área de interés, calculando un subconjunto de desviaciones globales que entran en la máscara, estimando una transformación de corrección basándose en el subconjunto de desviaciones globales, y produciendo un conjunto de parámetros de corrección que modela los efectos de reposicionamiento GBSAR;

estimar pares de desplazamientos para cada campaña extrayendo los efectos de reposicionamiento GBSAR

modelados por los parámetros de corrección del conjunto de pares de desviaciones globales, obteniendo de este modo una pluralidad de pares de desviaciones de desplazamientos expresadas en píxeles que, convirtiendo las desviaciones de desplazamiento expresadas en píxeles en desplazamientos expresados en una unidad de desplazamiento, y obteniendo un conjunto de pares de desplazamientos estimados definidos en un espacio de objeto mediante geocodificación que implica una transformación imagen a objeto.

ES 2 355 340 A1

## DESCRIPCIÓN

Método para monitorizar desplazamientos de terreno y de elementos creados por el hombre usando datos de radar de apertura sintética terrestre (GBSAR).

### Campo técnico de la invención

La presente invención se enmarca en el campo técnico de la monitorización de desplazamientos de terreno y de elementos creados por el hombre en áreas de interés y, en particular, en el campo de métodos de monitorización que hacen uso de datos de radar de apertura sintética terrestre (GBSAR).

### Antecedentes de la invención

Un radar de apertura sintética terrestre (GBSAR) es un sensor de adquisición de microondas activo que proporciona su propia iluminación y mide la señal reflejada por objetivos. En este contexto los objetivos son, normalmente, el terreno, los elementos creados por el hombre y cualquier otro elemento que forme parte de la escena observada. Al proporcionar su propia iluminación permite la adquisición de datos de día y de noche, independientemente de la luz natural. El radar de apertura sintética (SAR) es en la actualidad una técnica relativamente madura, con numerosos sistemas operativos a bordo de satélites y aeronaves. En la última década, la técnica SAR se ha implementado en plataformas terrestres o con base en tierra, ofreciendo herramientas de monitorización de desplazamiento flexibles que pueden iluminar un área de interés desde un punto de vista óptimo y adquieren imágenes con una frecuencia temporal no correlacionada.

A diferencia de otros instrumentos de medición de deformación terrestres, el GBSAR es un sistema de formación de imágenes (es decir que genera imágenes) que permite cubrir, de manera continua, la superficie observada hasta extensiones de aproximadamente 1 km<sup>2</sup> desde una única posición de medición. La técnica GBSAR se ha usado en una amplia gama de aplicaciones de monitorización: monitorización de deslizamiento de tierras, monitorización de glaciares, predicción de avalanchas, monitorización frontal de volcanes, monitorización de presas y monitorización de subsidencias. El uso de esta técnica para estas aplicaciones se ha descrito en diferentes documentos, véase por ejemplo Bernardini, G., Pasquale, G., Bucci, A., Marra, M., Coppi, F., y Ricci, P. (2007): "Microwave interferometer for ambient vibration measurement on civil engineering structures: 1. principles of the radar technique and laboratory tests", en Proc. Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'07); D. Tarchi, H. Rudolf, G. Luzi, L. Chiarantini, P. Coppo, y A. J. Sieber (1999): "SAR interferometry for structural changes detection: A demonstration test on a dam", en Proc. IGARSS 1999, págs. 1522-1524; M. Pieraccini, D. Tarchi, H. Rudolf, D. Leva, G. Luzi, y C. Atzeni (2000): "Interferometric radar for remote monitoring of building deformations" en Electron. Lett., vol. 36, n.º 6, págs. 569-570, marzo de 2000; M. Pieraccini, D. Mecatti, L. Noferini, G. Luzi, G. Franchioni, y C. Atzeni (2002): "SAR interferometry for detecting the effects of earthquakes on buildings" en NDT Int., vol. 35, págs. 615-625, agosto de 2002; D. Leva, G. Nico, D. Tarchi, J. Fortuny, y A. J. Sieber (2003): "Temporal analysis of a landslide by means of a ground-based SAR interferometer", en IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 41, n.º 4, págs. 745-752, abril de 2003; y M. Pieraccini, N. Casagli, G. Luzi, D. Tarchi, D. Mecatti, L. Noferini, y C. Atzeni (2002): "Landslide monitoring by ground-based radar interferometry: A field test in Valdarno (Italia)", en Int. J. Remote Sens., vol. 24, n.º 6, págs. 1385-1391, septiembre de 2002.

El método habitualmente empleado para estimar desplazamientos a partir de datos GBSAR ha sido la interferometría SAR que requiere dos componentes fundamentales. En primer lugar, necesita un sensor GBSAR coherente, que mide tanto la fase como la amplitud de la señal SAR. En segundo lugar, necesita adquisiciones SAR repetidas de la misma escena a lo largo del tiempo, empezando, al menos, por dos adquisiciones. Los eventuales desplazamientos de la escena observada entre dos adquisiciones SAR separadas en el tiempo se derivan calculando y analizando la fase interferométrica, que viene dada, en píxeles, por la diferencia entre la fase SAR adquirida en la primera campaña, menos la fase SAR de la segunda campaña. La principal ventaja de este enfoque es su alta sensibilidad a pequeños desplazamientos, que pueden medirse con una precisión que es una fracción de la longitud de onda SAR usada. Teniendo en cuenta que los sistemas GBSAR funcionan a longitudes de onda en la región de 1-5 cm, esto implica, para objetivos que son buenos dispersores, que puede conseguirse habitualmente una precisión de desplazamiento de submilímetros.

La condición *sine qua non* para usar la interferometría SAR es que un número suficiente de objetivos se mantengan coherentes durante el periodo de observación, que puede ser de varios meses o años, especialmente para fenómenos de deformación muy lentos. La primera limitación de la interferometría SAR viene dada por la pérdida de coherencia que los datos SAR pueden experimentar a lo largo del tiempo. Esto puede ser particularmente grave en áreas con vegetación y boscosas, y en escenas que cambian continuamente a lo largo del tiempo.

Una segunda limitación crítica es el solapamiento (*aliasing*). Debido a la naturaleza ambigua de las mediciones de fase interferométricas, el desplazamiento sufrido por una escena dada sólo puede estimarse correctamente, es decir sin ambigüedad, si satisfacen esta condición: los desplazamientos relativos que se producen realmente entre objetivos coherentes adyacentes provocan una diferencia de fase interferométrica de hasta medio ciclo de fase. En términos de desplazamientos esta condición impone un límite muy restrictivo que oscila desde aproximadamente 5 mm en la banda Ku hasta aproximadamente 15 mm en la banda C. Desde un punto de vista operativo, el riesgo de derivar estimaciones de desplazamiento ambiguas representa una limitación muy grave de la técnica.

Una tercera limitación se refiere a la componente atmosférica de la fase interferométrica, que está provocado por heterogeneidades, en el momento de las adquisiciones de imágenes SAR, en la atmósfera entre el sensor y el objetivo. La componente atmosférica puede degradar la calidad de la estimación de desplazamiento. En el peor de los casos, cuando fuertes señales atmosféricas están asociadas con objetivos coherentes dispersos espacialmente, puede provocar la estimación con ambigüedad de fase (esta operación se denomina desentrelazamiento de fase).

Finalmente, una cuarta limitación se debe a la naturaleza monodimensional de las mediciones interferométricas GBSAR, que son a lo largo de la línea de visión (LOS) del radar. De las tres posibles componentes de un desplazamiento en 3D genérico, la interferometría GBSAR sólo puede proporcionar una componente de desplazamiento, la componente LOS.

### Descripción de la invención

La presente invención pretende proporcionar mejoras con respecto a las limitaciones anteriormente mencionada de la técnica anterior proporcionando un método para la monitorización de desplazamientos de terreno y de elementos creados por el hombre usando datos de radar de apertura sintética terrestre. El método comprende estimar desplazamientos de objetivos ubicados en un área de interés que han tenido lugar entre una primera campaña y al menos una campaña posterior por medio de una comparación de un primer conjunto de datos de imágenes GBSAR adquiridas en la primera campaña en el área de interés con un conjunto posterior de datos de imágenes GBSAR adquiridas en la campaña posterior, originándose dichos datos de imágenes SAR a partir de imágenes SAR complejas obtenidas respectivamente en dichas campañas por medio de un instrumento GBSAR situado en una posición según parámetros de sensores que comprenden la posición y la orientación del instrumento GBSAR e iluminando dicha área de interés y una pluralidad de objetivos presentes en dicha área de interés, comprendiendo además el método

someter un primer conjunto de imágenes SAR complejas de calidad comprobada que se originan a partir de un primer conjunto de imágenes SAR complejas adquiridas en dicha primera campaña, a un preprocesamiento de datos mediante promediado temporal incoherente para obtener una primera imagen SAR media incoherente, y someter un segundo conjunto de imágenes SAR complejas de calidad comprobada que se originan a partir de un segundo conjunto de imágenes SAR complejas adquiridas en dicha campaña posterior, a preprocesamiento de datos mediante promediado temporal incoherente para obtener una segunda imagen SAR media incoherente, definiendo dichas imágenes SAR complejas un espacio de imagen SAR correspondiente a un espacio de objeto en el área de interés;

seleccionar, en la primera imagen SAR media incoherente, primeros píxeles que son representativos de dichos objetivos en dicho primer conjunto de datos de imágenes SAR adquiridas en la primera campaña, y seleccionar, en la segunda imagen SAR media incoherente, segundos píxeles que son representativos de dichos objetivos en dicho segundo conjunto de datos de imágenes SAR adquiridas en la segunda campaña, seleccionándose dichos objetivos a partir de reflectores angulares artificiales, si los ha desplegados, y reflectores naturales, tales como rocas, estructuras creadas por el hombre, estructuras metálicas y combinaciones de las mismas que están al descubierto, en el área de interés;

realizar una correlación global de imágenes, preferiblemente sobre la amplitud de los píxeles seleccionados, por los píxeles seleccionados para obtener un conjunto de pares de desviaciones globales expresadas en píxeles y que son representativas de una desviación de imagen necesaria para hacer coincidir un píxel dado de dicha primera imagen SAR con un píxel homólogo de dicha segunda imagen SAR, y seleccionar una pluralidad de pares de desviaciones globales con puntuación de calidad entre los pares de desviaciones globales, aplicando una puntuación de correlación que mide la calidad de la correlación de las imágenes SAR medias incoherentes, tal como el coeficiente de relación cruzada o el sigma cero de correlación de mínimos cuadrados;

estimar efectos de reposicionamiento GBSAR debidos a diferencias entre la posición y la orientación del instrumento GBSAR en dicha primera campaña y en dicha segunda campaña, obteniendo una máscara que comprende píxeles de área estable correspondientes a áreas estables en el área de interés, calculando un subconjunto de desviaciones globales que entran en la máscara, estimando una transformación de corrección de dichos subconjuntos de desviaciones globales, y produciendo un conjunto de parámetros de corrección que modela los efectos de reposicionamiento GBSAR;

estimar pares de desplazamientos para dicha primera campaña y dicha campaña posterior extrayendo los efectos de reposicionamiento GBSAR modelados por los parámetros de corrección del conjunto de pares de desviaciones globales, obteniendo de este modo una pluralidad de pares de desviaciones de desplazamientos expresadas en píxeles que se refieren a desplazamientos con respecto a la totalidad de los píxeles de área estable, convirtiendo las desviaciones de desplazamiento expresadas en píxeles en desplazamientos expresados en una unidad de desplazamiento, y obteniendo un conjunto de pares de desplazamientos estimados definidos en un espacio de objeto mediante geocodificación, que implica una transformación imagen a objeto.

En una realización de la invención, el método también comprende una estimación de una serie de tiempos de desplazamiento obteniendo un conjunto de pares de desplazamientos estimados para cada par de campañas que van a analizarse, e identificando un conjunto común de desplazamientos estimados llevando a cabo una intersección de todos los conjuntos de desplazamientos estimados, obteniendo de este modo un subconjunto de desplazamientos estimados para cada par de campañas. La serie de tiempos de desplazamiento puede obtenerse entonces mediante integración

directa de los subconjuntos de desplazamiento estimado y definiendo la serie de tiempos de desplazamiento en un espacio de objeto, o por medio de un procedimiento de estimación de mínimos cuadrados, que refleja los resultados atípicos en el subconjunto de pares de desplazamientos estimados, y definiendo entonces la serie de tiempos de desplazamiento en un espacio de objeto. En este último caso, la estimación de la serie de tiempos de desplazamiento puede llevarse a cabo de manera iterativa.

Según la invención, las imágenes SAR complejas de calidad comprobada se obtienen sometiendo cada imagen SAR compleja a una comprobación de calidad y descartando imágenes con problemas.

La máscara que comprende píxeles de área estable puede obtenerse recopilando información externa sobre las áreas estables en un espacio de objeto correspondiente a dicho espacio de imagen SAR, y mapeando dicha información externa en el espacio de imagen SAR en píxeles teniendo en cuenta dichos parámetros de sensores.

La presente invención ofrece ventajas notables con respecto al enfoque interferométrico GBSAR convencional.

El uso de técnicas de correlación de imágenes en amplitud sobre las imágenes GBSAR ofrece estas ventajas:

- proporciona estimaciones de desplazamiento no ambiguas, sin solapamiento. Ésta es la ventaja más importante del procedimiento propuesto.

- Las estimaciones de desplazamiento no se ven afectadas por los efectos atmosféricos descritos anteriormente.

- Proporciona mediciones de desplazamiento en 2D, en las direcciones de alcance y perpendicular al alcance, que representan una mejora con respecto a las estimaciones LOS procedentes de la interferometría GBSAR. Cabe destacar que los rendimientos de las estimaciones en 2D dependen de las características geométricas de las imágenes GBSAR usadas. En general se esperan peores rendimientos en la dirección perpendicular al alcance, especialmente en el alcance medio y lejano de las imágenes, en el que se degrada la resolución espacial.

Además, empleando CR se obtienen dos ventajas adicionales fundamentales:

- Pueden conseguirse estimaciones de desplazamiento precisas y fiables. Es importante observar que aquí se estiman los desplazamientos sobre objetivos individuales, mientras que habitualmente la correlación de amplitud SAR se emplea habitualmente con fines de corrección, en el que se usan cientos de puntos para estimar un conjunto limitado de parámetros (habitualmente menos de 10 para toda la imagen). En este caso es necesario basarse en los dos desplazamientos (es decir las dos desviaciones) por cada objetivo medido: en este contexto los CR son fundamentales.

- Finalmente los CR garantizan la posibilidad de medir los mismos objetivos a lo largo del tiempo. Se trata de la misma ventaja que se consiguió usando CR en interferometría GBSAR.

## Breve descripción de los dibujos

A continuación en el presente documento se describirán aspectos y realizaciones de la invención basándose en los dibujos, en los que

la figura 1 es un diagrama de bloques de una realización del método según la presente invención;

la figura 2 es un diagrama de bloques de una etapa de adquisición de datos usada en el método de la presente invención;

la figura 3 es un diagrama de bloques de una etapa de preprocesamiento de datos usada en el método de la presente invención;

la figura 4 es un diagrama de bloques de una etapa de correlación global usada en el método de la presente invención;

la figura 5 es un diagrama de bloques de una etapa para la estimación del efecto de reposicionamiento GBSAR usada en el método de la presente invención;

la figura 6 es un diagrama de bloques de una etapa de estimación de desplazamiento usada en el método de la presente invención;

la figura 7 es un diagrama de bloques de una etapa de estimación de serie de tiempos de desplazamiento usada en el método de la presente invención;

la figura 8 es una imagen de un deslizamiento de tierras correspondiente a un área de interés (Aol) al que se ha aplicado una realización práctica del método;

la figura 9 es una imagen de uno de los reflectores angulares (CR) usados en dicha realización práctica;

la figura 10 muestra las amplitudes de dos imágenes SAR medias incoherentes obtenidas en dicha realización práctica;

la figura 11 es una visualización de las mediciones de desplazamientos en la dirección de alcance en dicha realización.

## Realizaciones de la invención

La figura 1 muestra una realización del método de la presente invención. Como es evidente, en esta realización, el método comprende las siguientes etapas principales:

una etapa de adquisición de datos, que se repite hasta  $N$  veces, siendo  $N$  el número total de campañas;

una etapa de preprocesamiento de datos, que se repite hasta  $N$  veces, una vez por cada campaña;

una etapa de correlación global, ejecutada para cada par analizado  $ij$  de campañas; una etapa para la estimación de los efectos de reposicionamiento GBSAR, ejecutada para cada par analizado  $ij$  de campañas;

una etapa para la estimación de los pares de desplazamientos, ejecutada para cada par analizado  $ij$  de campañas; y

una etapa para la estimación de la serie de tiempos de desplazamiento, ejecutada una vez para todas las campañas.

Tal como se muestra en la figura 2, en la etapa de adquisición de datos se obtienen datos por medio de  $N$  campañas *in situ*. Cada campaña implica instalar un instrumento GBSAR en una posición para iluminar completamente el área de interés (Aol). Habitualmente el posicionamiento GBSAR (y el reposicionamiento en las siguientes campañas) se realiza de un modo relativamente ligero, por ejemplo sin construir una base de hormigón estable. Esto facilita el procedimiento de adquisición de datos, y desplegando un conjunto de  $M$  CR en el Aol. A continuación, se adquieren  $K$  imágenes SAR complejas iluminando el Aol mediante el instrumento GBSAR.

Según la figura 3, la etapa de preprocesamiento de datos se realiza en cada conjunto de  $K$  imágenes SAR complejas adquiridas en una campaña, y por tanto se repite hasta  $N$  veces. El preprocesamiento de datos implica una comprobación de la calidad de cada imagen SAR compleja adquirida, con el objetivo de detectar y, eventualmente, descartar imágenes con problemas, por ejemplo archivos corruptos, imágenes con mucho ruido, imágenes caracterizadas por valores de amplitud borrosos, etc. Entonces, sobre el subconjunto de imágenes con calidad comprobada, que incluye  $Q \leq K$  imágenes, se realiza un filtrado temporal. La finalidad del filtrado es la mejora de las imágenes de amplitud SAR (un subproducto de las imágenes SAR complejas) reduciendo enormemente el denominado efecto de moteado. Esto se consigue mediante un promediado temporal incoherente de las  $Q$  imágenes. El resultado de esto es una imagen SAR promediada de manera incoherente.

En la etapa de correlación global mostrada en la figura 4, se realiza una correlación global sobre cada par analizado  $ij$  de campañas. Dadas  $N$  campañas, el número mínimo de correlaciones globales es  $N-1$ , por ejemplo realizando la secuencia temporal  $12, 23, \dots, ij, \dots, (N-1)N$ , o cualquier otra combinación. La correlación global implica tomar, como entrada, un par de imágenes SAR promediadas de manera incoherente, sea la imagen  $_j$  y la imagen  $_i$ . La primera imagen también puede denominarse imagen principal, mientras que la segunda puede denominarse imagen secundaria. A continuación se lleva a cabo la selección de píxeles, cuya finalidad es identificar aquellos píxeles de las dos imágenes que pueden aprovecharse con fines de correlación de imágenes, descartando los demás. Los píxeles que van a seleccionarse incluyen los asociados con los  $M$  CR desplegados, y otros relacionados con "reflectores naturales", como rocas, edificios, estructuras creadas por el hombre, estructuras metálicas, etc. que están al descubierto. Puede usarse diferentes procedimientos con este fin, que habitualmente se basan en las imágenes de amplitud derivadas de las imágenes de entrada, o en otras estadísticas. Una selección eficaz puede conseguirse seleccionando todos los píxeles cuyo valor de amplitud está por encima de un umbral dado. Entonces, se realiza la correlación global de imágenes sobre el conjunto de píxeles seleccionado en la etapa previa. Pueden usarse diversos algoritmos con este fin. Se sugiere trabajar solo sobre la amplitud de las imágenes SAR complejas y usar procedimientos de correlación tan precisos como sea posible, debido al impacto directo de la calidad de la correlación sobre las estimaciones de desplazamiento finales. Una selección adicional se realiza entonces sobre el resultado de la correlación global, es decir  $W$  pares de desviaciones globales (expresadas en píxeles). Cada par contiene una desviación de imagen (la desviación necesaria para hacer coincidir un píxel secundario dado con su homólogo en la imagen principal) para cada una de las dos direcciones principales de las imágenes SAR: la dirección de alcance y la dirección de acimut o perpendicular al alcance. La selección se realiza según una puntuación que mide la calidad de la correlación, que está relacionada habitualmente con el procedimiento de correlación de imágenes usado. Ejemplos de estas puntuaciones

pueden ser el coeficiente de correlación cruzada, el sigma cero en caso de correlación de mínimos cuadrados (LS) u otros indicadores de la adecuación del ajuste secundario-principal. El resultado de la correlación global es un conjunto seleccionado de  $R \leq W$  pares de desviaciones globales.

Después de la correlación global, se realiza la etapa de estimación de efectos de reposicionamiento GBSAR mostrada en la figura 5. La estimación de los efectos de reposicionamiento GBSAR, al igual que la correlación global, se realiza sobre cada par analizado  $ij$  de campañas. Estos efectos se deben al hecho de que habitualmente hay ligeros cambios en la posición y la orientación del GBSAR entre diferentes campañas. La estimación de estos efectos implica en primer lugar recopilar información externa sobre las áreas estables ubicadas en la proximidad del Aol de la deformación. Esta información está disponible habitualmente si se conocen el mecanismo de deformación y las características clave del fenómeno de deformación en cuestión. En caso de que esta información no esté disponible, una forma alternativa de obtenerla es analizando el conjunto de  $R$  pares de desviaciones globales estimadas en la etapa previa. Si la información de las áreas estables se conoce en el denominado espacio de objeto, por ejemplo un sistema de referencia cartográfico o geográfico, debe mapearse apropiadamente en el espacio de imagen SAR que va a utilizarse. Esta operación, que requiere como entrada la posición y la orientación del GBSAR, es la inversa de la operación de geocodificación mencionada más adelante en este documento. El resultado de esta operación es una máscara que identifica todas las áreas estables en el espacio de imagen SAR. Usando la máscara anteriormente mencionada, se calcula un subconjunto de los  $R$  pares de desviaciones globales, que viene dado por las  $S \leq R$  desviaciones globales que entran en la máscara de áreas estables.

Las  $S$  desviaciones globales se usan para estimar la denominada transformación de corrección, es decir la transformación principal a secundario que se debe a los efectos de reposicionamiento GBSAR. La complejidad de la transformación depende principalmente de la topografía del Aol y la distancia del Aol respecto al sensor. La experiencia de los inventores sugiere que, excluyendo escenarios a muy corto alcance, por ejemplo menos de 50-100 m, y fuertes variaciones topográficas, una transformación afín, o cualquier transformación equivalente, es suficiente con este fin.

El resultado final de esta etapa es un conjunto de parámetros de transformación que modelan los efectos de reposicionamiento GBSAR y se usan para realizar el corrección secundario a principal. Para completar, ha de mencionarse que los parámetros de transformación de corrección podrían estimarse directamente midiendo con precisión y en cada campaña la posición y la orientación del GBSAR.

La estimación de los pares de desplazamientos tal como se muestra en la figura 6 se realiza sobre cada par analizado  $ij$  de campañas. Implica, extraer en primer lugar los efectos de reposicionamiento GBSAR, que se han modelado mediante los parámetros de transformación de corrección, del conjunto de  $R$  pares de desviaciones globales. Esto da como resultado  $R$  pares de desviaciones de desplazamiento, siendo los desplazamientos, desplazamientos relativos con respecto al conjunto completo de áreas estables anteriormente mencionado. Según se mencionó anteriormente, los  $R$  pares de desviaciones de desplazamiento incluyen las desviaciones asociadas con los  $M$  CR desplegados y otras relacionadas con “reflectores naturales” ubicados en el Aol.

Teniendo en cuenta los parámetros de imágenes GBSAR, las desviaciones de desplazamiento anteriores que hasta ahora se expresaban en píxeles, se transforman en valores de desplazamientos físicos, eligiendo una unidad de desplazamiento apropiada, normalmente mm, cm o m. Cabe observar que en esta etapa los desplazamientos todavía están definidos en el espacio de imagen, que habitualmente coincide con la imagen principal SAR. Finalmente, considerando que los parámetros de sensores GBSAR (posición y orientación GBSAR, etc.), se realiza una geocodificación de imagen. Esto implica una transformación imagen a objeto. El resultado final es un conjunto de  $R$  pares de desplazamientos estimados definidos en el espacio de objeto, es decir en un sistema de coordenadas de referencia cartográfico o geográfico.

La estimación de la serie de tiempos de desplazamiento mostrada en la figura 7 debe ejecutarse una vez para todas las campañas, para obtener el principal producto de todo el procedimiento, es decir la serie de tiempos de desplazamiento estimada. Implica tomar, para cada par analizado  $ij$  de campañas, un conjunto de  $R_{ij}$  pares de desplazamientos estimados definidos en el espacio de objeto. Obsérvese que los conjuntos  $R_{ij}$  habitualmente son diferentes. Por este motivo, el conjunto común debe identificarse tomando la intersección de todos los  $R_{ij}$  conjuntos. A partir de cada par  $ij$  de campañas se define un nuevo subconjunto:  $T_{ij}$ . Si se ha analizado el número mínimo de pares de campañas, puede calcularse la serie de tiempos de desplazamiento mediante integración directa de los  $T_{ij}$  pares de desplazamientos estimados. En cambio, si se usa una configuración redundante, las series de tiempos de desplazamiento se estiman mediante un procedimiento de estimación LS.

La configuración redundante ofrece la ventaja de tener un cierto grado de controlabilidad de los desplazamientos. En particular, la estimación LS puede analizarse para identificar y aislar resultados atípicos en los datos de entrada, es decir los  $T_{ij}$  pares de desplazamientos estimados. Este proceso puede ser iterativo.

El producto final lo proporciona la solución LS final: un conjunto de  $T$  series de tiempos de desplazamiento estimadas, definidos en el espacio de objeto, es decir en un sistema de coordenadas de referencia cartográfico o geográfico.

Las figuras 8 a 11 muestran una realización práctica de la invención aplicada a desplazamientos asociados con un deslizamiento de tierras ubicado en el Pirineo catalán (España). El Aol se muestra en la figura 8. En el Aol se

desplegaron 13 CR de los que se muestra uno representativo en la figura 9. El GBSAR se ubicó en un punto que iluminaba todo el Aol, con una distancia promedio sensor-objetivo de aproximadamente 500 m. La adquisición de datos se realizó dos veces: campaña\_1 y campaña\_2. En ambas campañas se adquirieron múltiples imágenes SAR complejas: 15 en la campaña\_1 y 19 en la campaña\_2.

En el preprocesamiento de datos todas las imágenes adquiridas mostraron tener buena calidad. Mediante el filtrado temporal de los dos conjuntos de imágenes SAR complejas obtenidas respectivamente en la campaña\_1 y en la campaña\_2, se derivaron dos imágenes SAR medias incoherentes, véase la figura 10, en la que la imagen de la izquierda corresponde a la campaña\_1 y la imagen de la derecha a la campaña\_2.

Se aplicó entonces una etapa de correlación global, seguida de una estimación de los efectos de reposicionamiento GBSAR, y la estimación de los pares de desplazamientos. Los resultados de estas operaciones se resumen en la siguiente tabla.

| CR<br>n.º | Columna<br>del CR<br>[píxeles] | Línea<br>del CR<br>[píxeles] | Distancia<br>sensor-<br>objetivo<br>[m] | Puntuación<br>de calidad<br>de la<br>correlación | Desviación de<br>desplazamiento<br>en alcance<br>[píxel] | Desplazamientos<br>en alcance [cm] |
|-----------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 1         | 216                            | 2097                         | 552                                     | 0,97                                             | 0,29                                                     | -14,50                             |
| 2         | 240                            | 2137                         | 532                                     | 0,97                                             | 0,29                                                     | -14,50                             |
| 3         | 247                            | 2153                         | 524                                     | 0,86                                             | 0,30                                                     | -15,00                             |
| 4         | 269                            | 2108                         | 546,5                                   | 0,89                                             | 0,38                                                     | -19,00                             |
| 5         | 251                            | 2000                         | 600,5                                   | 0,96                                             | 0,38                                                     | -19,00                             |
| 6         | 230                            | 1962                         | 619,5                                   | 0,89                                             | 0,16                                                     | -8,00                              |
| 7         | 277                            | 2148                         | 526,5                                   | 0,85                                             | 0,30                                                     | -15,00                             |
| 8         | 243                            | 2236                         | 482,5                                   | 0,98                                             | 0,33                                                     | -16,50                             |
| 9         | 200                            | 2319                         | 441                                     | 0,89                                             | 0,35                                                     | -17,50                             |
| 10        | 225                            | 2235                         | 483                                     | 0,93                                             | 0,24                                                     | -12,00                             |
| 11        | 210                            | 2138                         | 531,5                                   | 0,98                                             | 0,36                                                     | -18,00                             |
| 12        | 199                            | 2185                         | 508                                     | 0,91                                             | 0,47                                                     | -23,50                             |
| 13        | 188                            | 2152                         | 524,5                                   | 0,80                                             | 0,00                                                     | 0,00                               |

Esta tabla resume el principal resultado del análisis. Para cada CR se muestran la posición en la imagen SAR (columna y línea), la distancia con respecto al sensor, la puntuación de calidad de la correlación global, la desviación de desplazamiento en la dirección de alcance en píxeles, y el desplazamiento en la dirección de alcance expresado en cm. El signo negativo de este último indica de forma convencional que entre la campaña\_1 y la campaña\_2 el CR se desplazó hacia el sensor. Como resulta evidente, a parte del CR 13, que está ubicado en un área estable, todos los demás CR mostraron desplazamientos en la dirección de alcance de entre 8 y 23,5 cm. Una visualización de los desplazamientos se muestra en la figura 11.

No se realizó una estimación de la serie de tiempos de desplazamiento, debido a que sólo se realizaron dos campañas de adquisición de datos.

## REIVINDICACIONES

1. Un método para monitorizar electrónicamente desplazamientos de terreno y de elementos creados por el hombre usando datos de radar de apertura sintética terrestre, comprendiendo el método estimar desplazamientos de objetivos ubicados en un área de interés que han tenido lugar entre al menos una primera campaña y al menos una campaña posterior por medio de una comparación de un primer conjunto de datos de imágenes SAR adquiridos en la primera campaña en el área de interés con un conjunto posterior de datos de imágenes GBSAR adquiridos en la campaña posterior en el área de interés, originándose dichos datos de imágenes SAR a partir de imágenes SAR complejas obtenidas respectivamente en dichas campañas por medio de un instrumento GBSAR situado en una posición según parámetros de sensores que comprenden la posición y la orientación del instrumento GBSAR e iluminando dicha área de interés y una pluralidad de objetivos presentes en dicha área de interés, **caracterizado** porque el método comprende

someter un primer conjunto de imágenes SAR complejas de calidad comprobada que se originan a partir de un primer conjunto de imágenes SAR complejas adquiridas en dicha primera campaña, a un preprocesamiento de datos mediante promediado temporal incoherente para obtener una primera imagen SAR media incoherente, y someter un segundo conjunto de imágenes SAR complejas de calidad comprobada que se originan a partir de un segundo conjunto de imágenes SAR complejas adquiridas en dicha campaña posterior, a preprocesamiento de datos mediante promediado temporal incoherente para obtener una segunda imagen SAR media incoherente;

seleccionar, en la primera imagen SAR media incoherente, primeros píxeles que son representativos de dichos objetivos en dicho primer conjunto de datos de imágenes SAR adquiridas en la primera campaña, y seleccionar, en la segunda imagen SAR media incoherente, segundos píxeles que son representativos de dichos objetivos en dicho segundo conjunto de datos de imágenes SAR adquiridas en la segunda campaña, seleccionándose dichos objetivos a partir de reflectores angulares artificiales, si los ha desplegados, y reflectores naturales en el área de interés;

realizar una correlación global de imágenes por los píxeles seleccionados para obtener un conjunto de pares de desviaciones globales expresadas en píxeles y que son representativas de una desviación de imagen necesaria para hacer coincidir un píxel dado de dicha primera imagen SAR con un píxel homólogo de dicha segunda imagen SAR, y seleccionar una pluralidad de pares de desviaciones globales con puntuación de calidad entre los pares de desviaciones globales, aplicando una puntuación de correlación que mide la calidad de la correlación de las imágenes SAR medias incoherentes;

estimar efectos de reposicionamiento GBSAR debidos a diferencias entre la posición y la orientación del instrumento GBSAR en dicha primera campaña y en dicha segunda campaña, obteniendo una máscara que comprende píxeles de área estable correspondientes a áreas estables en el área de interés, calculando un subconjunto de desviaciones globales que entran en la máscara, estimando una transformación de corrección de dichos subconjuntos de desviaciones globales, y produciendo un conjunto de parámetros de corrección que modela los efectos de reposicionamiento GBSAR;

estimar pares de desplazamientos para dicha primera campaña y dicha campaña posterior extrayendo los efectos de reposicionamiento GBSAR modelados por los parámetros de corrección del conjunto de pares de desviaciones globales, obteniendo de este modo una pluralidad de pares de desviaciones de desplazamientos expresadas en píxeles que se refieren a desplazamientos con respecto a la totalidad de los píxeles de área estable, convirtiendo las desviaciones de desplazamiento expresadas en píxeles en desplazamientos expresados en una unidad de desplazamiento, y obteniendo un conjunto de pares de desplazamientos estimados definidos en un espacio de objeto mediante geocodificación, que implica una transformación imagen a objeto.

2. Un método según la reivindicación 1, **caracterizado** porque las imágenes SAR complejas de calidad comprobada se obtienen sometiendo cada imagen SAR compleja a una comprobación de calidad y descargando las imágenes con problemas.

3. Un método según la reivindicación 1 ó 2, **caracterizado** porque el promediado temporal incoherente comprende someter cada imagen con calidad comprobada a un filtrado temporal para mejorar imágenes de amplitud SAR reduciendo los efectos de moteado.

4. Un método según la reivindicación 1, 2 ó 3, **caracterizado** porque dichos reflectores naturales se seleccionan de rocas, estructuras creadas por el hombre, estructuras metálicas y combinaciones de las mismas que están al descubierto.

5. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado** porque dichos primeros píxeles y dichos segundos píxeles se seleccionan tomando los píxeles que tienen un valor de amplitud por encima de un valor umbral dado.

6. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado** porque la correlación global de imágenes se lleva a cabo sobre la amplitud de los píxeles seleccionados.



## ES 2 355 340 A1

7. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, **caracterizado** porque la puntuación de correlación que mide la calidad de la correlación es un coeficiente de relación cruzada o un sigma cero de correlación de mínimos cuadrados.

5 8. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado** porque dicha máscara que comprende píxeles de área estable se obtiene recopilando información externa sobre las áreas estables en un espacio de objeto, y mapeando dicha información externa en el espacio de imagen SAR teniendo en cuenta dichos parámetros de sensores.

10 9. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado** porque dicha máscara que comprende píxeles de área estable se obtiene analizando dichos pares de desviaciones globales obtenidas después de realizar la formación de imágenes global.

15 10. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque comprende una estimación de una serie de tiempos de desplazamiento mediante

la obtención de un conjunto de pares de desplazamientos estimados para cada par de campañas que van a analizarse, e identificar un conjunto común de desplazamientos estimados llevando a cabo una intersección de todo el conjunto de desplazamientos estimados, obteniendo de este modo un subconjunto de desplazamientos estimados para cada par de campañas;

20 el cálculo de la serie de tiempos de desplazamiento mediante integración directa de los subconjuntos de desplazamiento estimado y definiendo la serie de tiempos de desplazamiento en un espacio de objeto.

25 11. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, **caracterizado** porque comprende una estimación de una serie de tiempos de desplazamiento mediante

30 la obtención de un conjunto de pares de desplazamientos estimados para cada par de campañas que van a analizarse, e identificar un conjunto común de desplazamientos estimados llevando a cabo una intersección de todo el conjunto de desplazamientos estimados, obteniendo de este modo un subconjunto de desplazamientos estimados para cada par de campañas;

35 estimar la serie de tiempos de desplazamiento por medio de un procedimiento de estimación de mínimos cuadrados, rechazando resultados atípicos en el subconjunto de pares de desplazamientos estimados;

definir la serie de tiempos de desplazamiento en un espacio de objeto.

40 12. Un método según la reivindicación 11, **caracterizado** porque la estimación de la serie de tiempos de desplazamiento se lleva a cabo de manera iterativa.

45

50

55

60

65

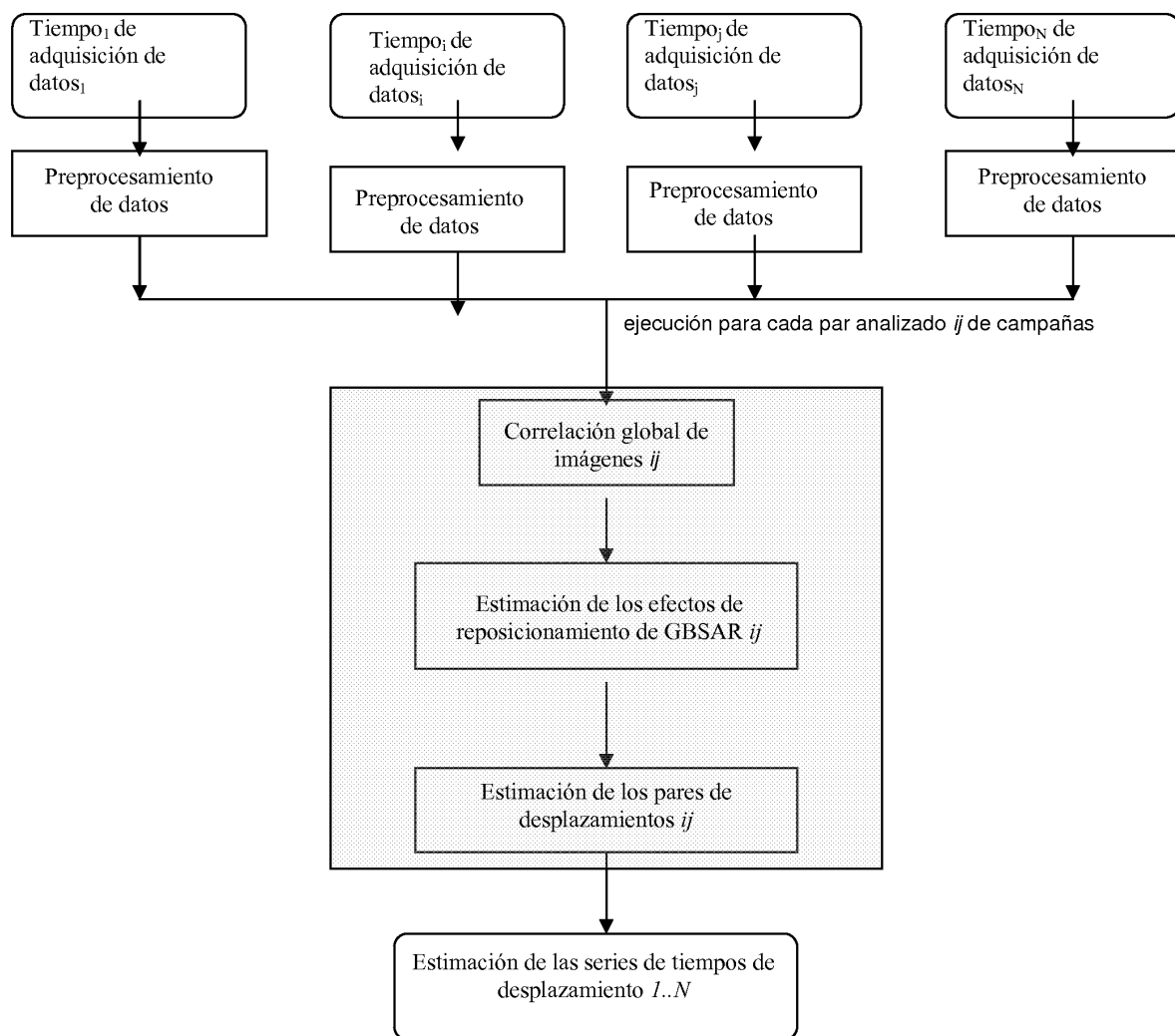


Figura 1

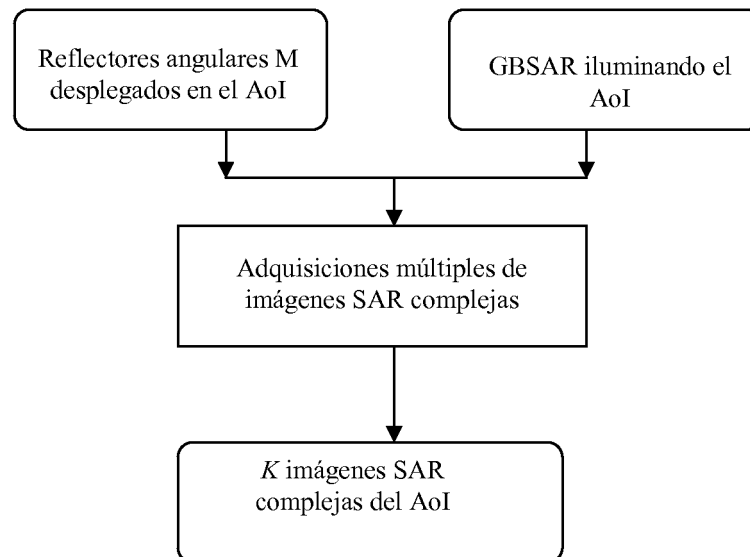


Figura 2

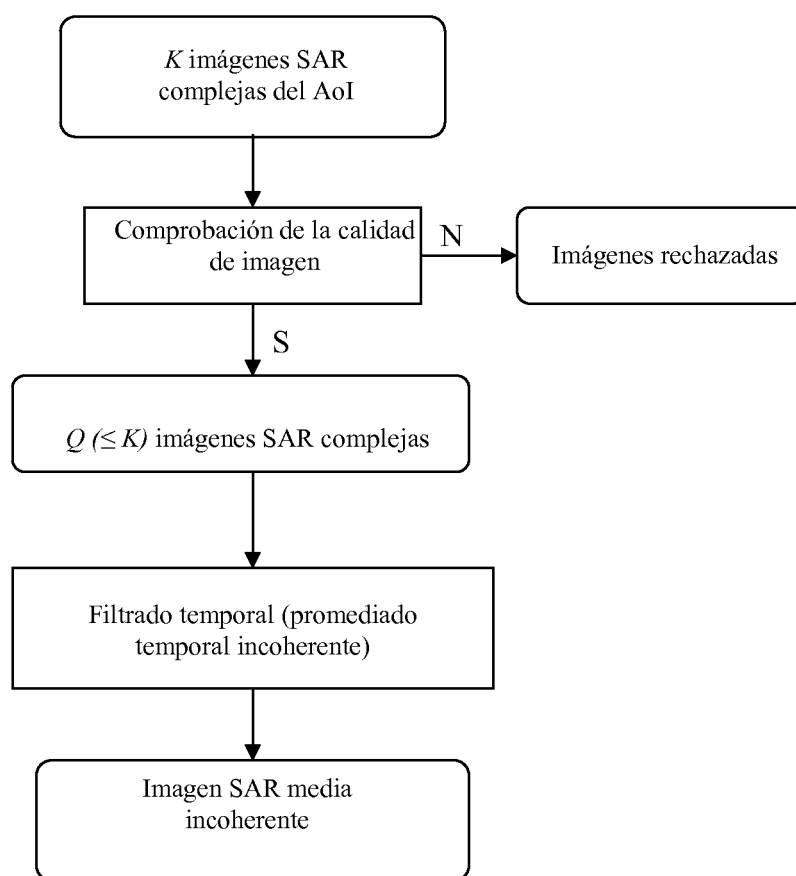


Figura 3

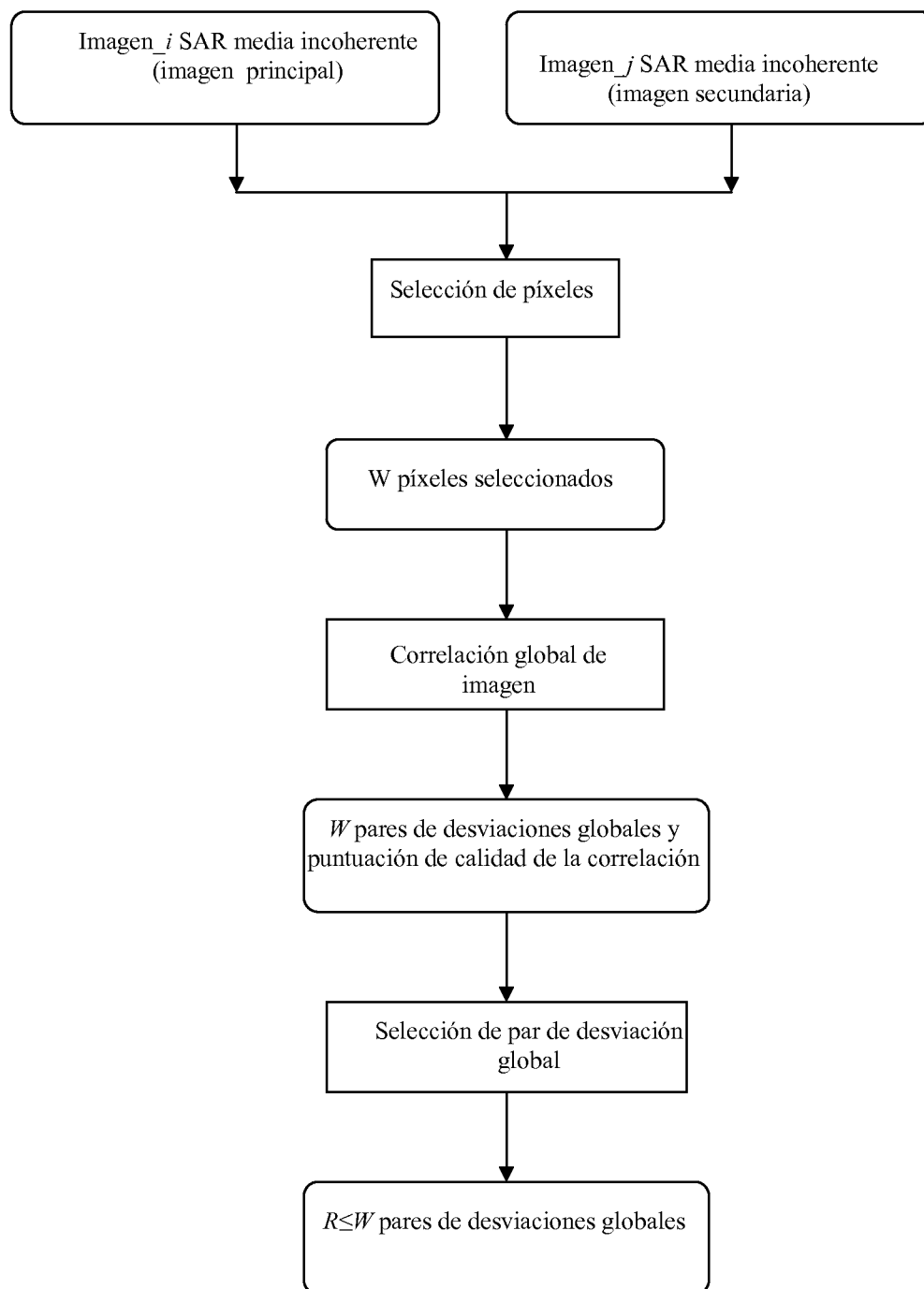


Figura 4

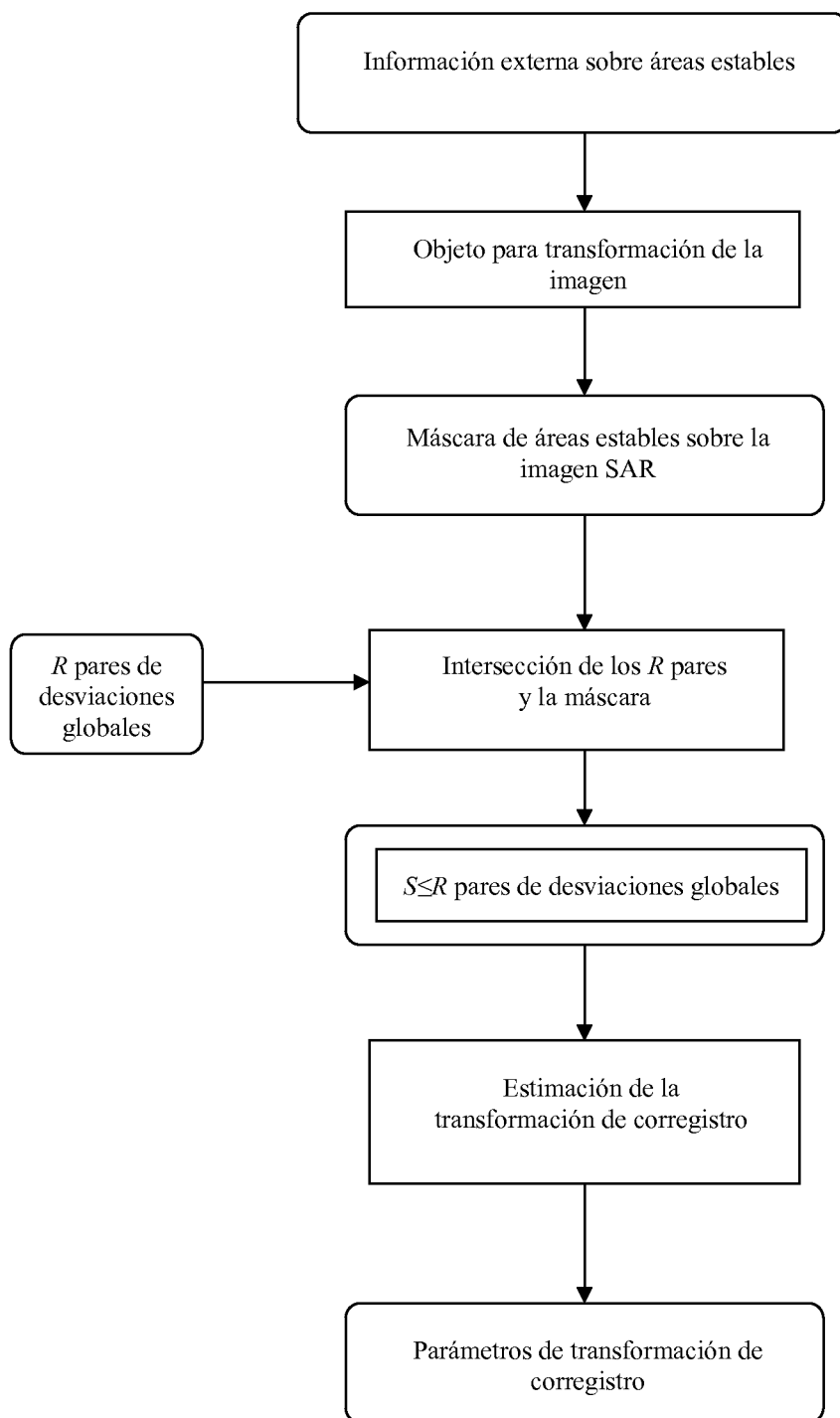


Figura 5

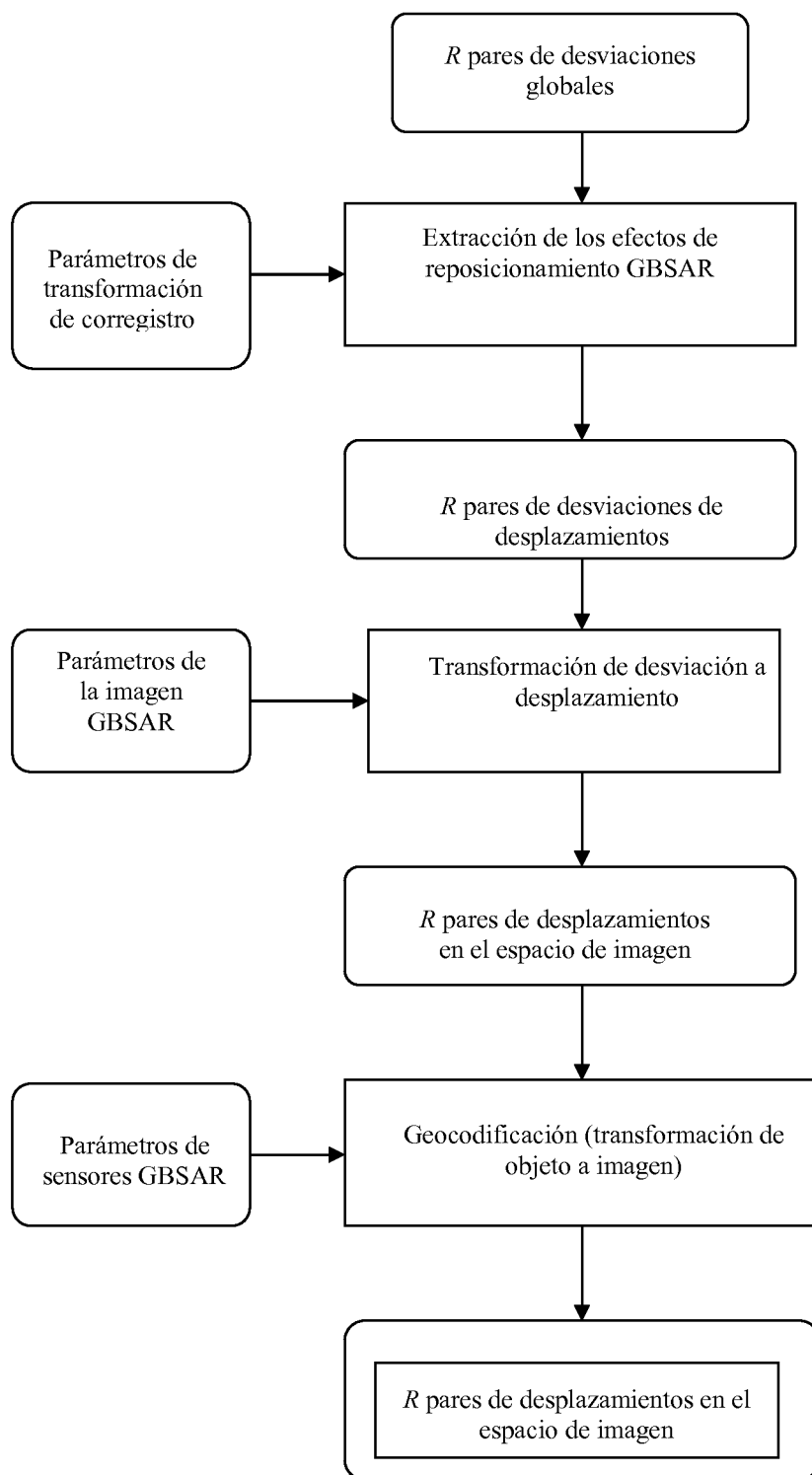


Figura 6

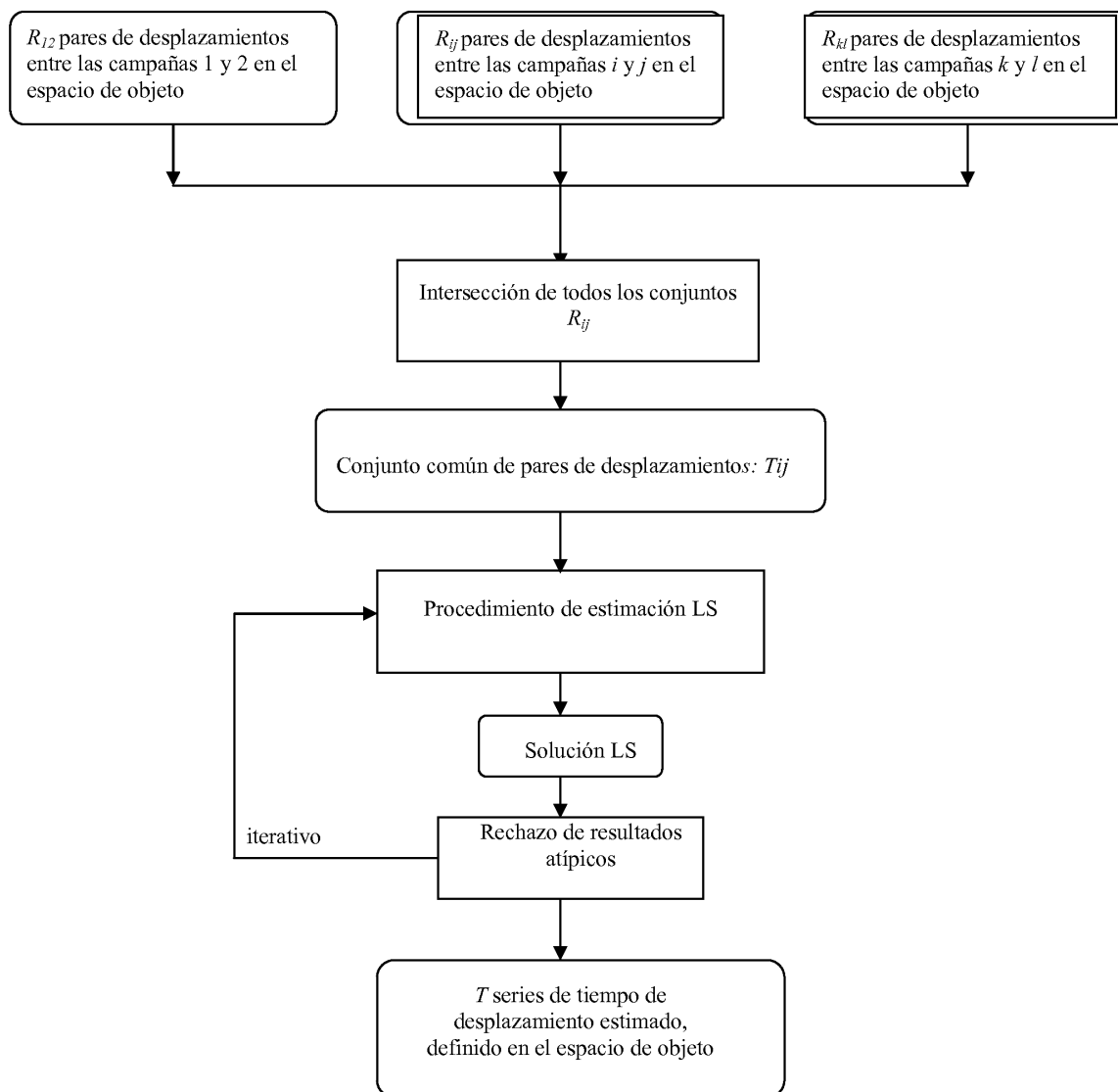


Figura 7



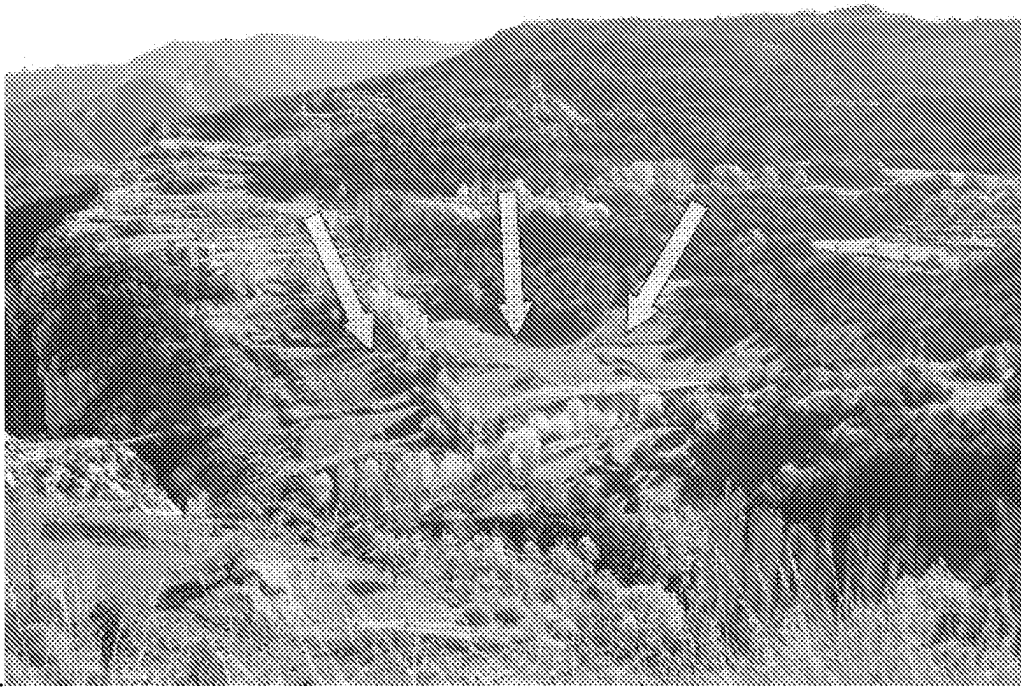


Figura 8



Figura 9

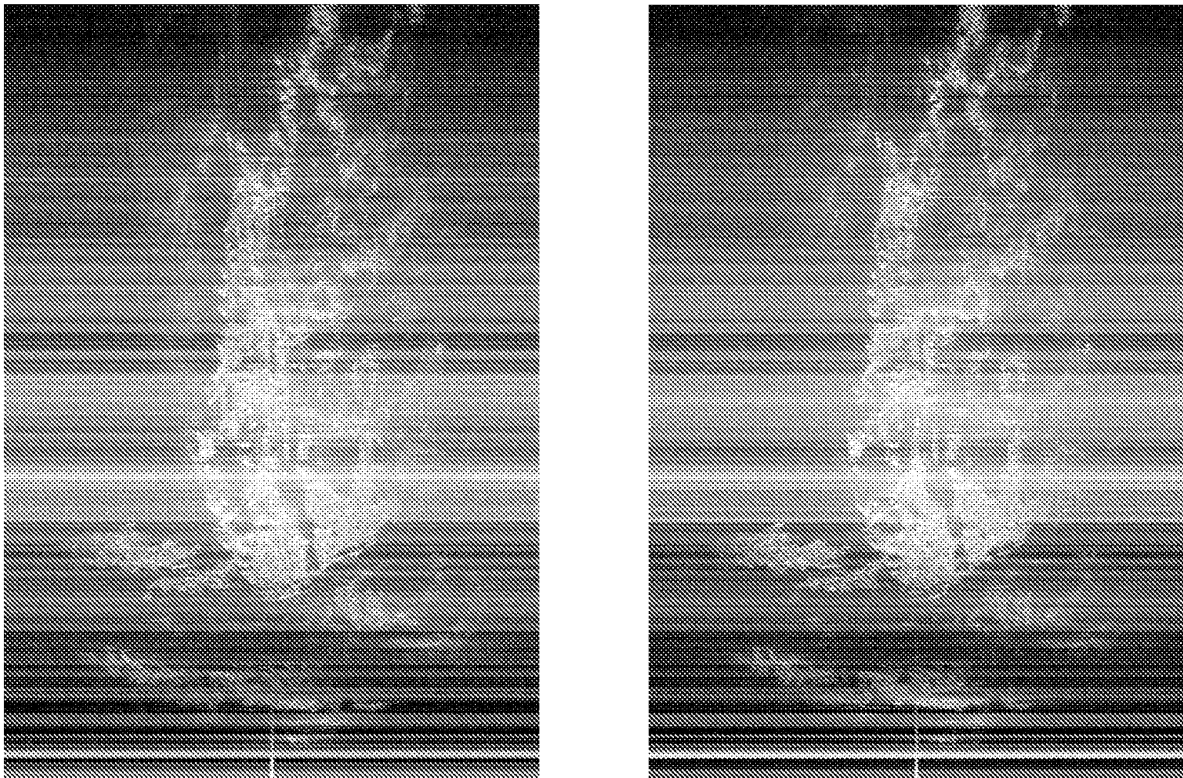


Figura 10



→  
10 cm

Figura 11



OFICINA ESPAÑOLA  
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

②① N.º solicitud: 201031149

②② Fecha de presentación de la solicitud: 26.07.2010

③② Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤① Int. Cl.: **G01S13/90** (01.01.2006)

### DOCUMENTOS RELEVANTES

| Categoría | Documentos citados                                                                                                                                                                                                                                                         | Reivindicaciones afectadas |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| A         | GUIDO LUZI, MASSIMILIANO PIERACCINI, DANIELLE MECATTI, LINHSIA NOFERINI, GABRIELE GUIDI, FABIO MOIA, CARLO ATZENI, "Ground Based Radar Interferometry for Landslides Monitoring: Atmospheric and instrumental decorrelation Sources on experimental data", Noviembre 2004. | 1                          |
| A         | DAVIDA LEVA, GIOVANI NICO, DARIO TARCHI, JOAQUIM FORTUNY-GUASCH, ALOIS J. SIEBER, "Temporal analysis of a landslide by means of a Ground-Based SAR Interferometer", Abril 2003.                                                                                            | 1                          |
| A         | LINHSIA NOFERINI, MASSIMILIANO PIERACCINI, GUIDO LUZI, DANIELLE MECATTI, GIOVANI MACALUSO, CARLO ATZENI, "Ground-Based radar interferometry for monitoring unstable slopes", 22-24 de Mayo de 2006.                                                                        | 1                          |
| A         | G. NICO, D. LEVA, G. ANTONELLO, D. TARCHI, "Ground-based SAR Interferometry for terrain Mapping: Theory and sensitivity analysis", Junio 2004.                                                                                                                             | 1                          |
| A         | SABINE RODELSPERGER, GWENDOLYN LAÜFER, CARL GERSTENECKER, MATTHIAS BECKER, "Monitoring of displacements with ground-based microwave interferometry: IBIS-S and IBIS-L", 15 de Junio de 2010.                                                                               | 1                          |

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

#### El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones

☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
09.03.2011

Examinador  
Rafael San Vicente Domingo

Página  
1/4

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01S

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 09.03.2011

**Declaración**

|                                                 |                       |           |
|-------------------------------------------------|-----------------------|-----------|
| <b>Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)</b>            | Reivindicaciones 1-12 | <b>SI</b> |
|                                                 | Reivindicaciones      | <b>NO</b> |
| <b>Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)</b> | Reivindicaciones 1-12 | <b>SI</b> |
|                                                 | Reivindicaciones      | <b>NO</b> |

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

**Base de la Opinión.-**

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

**1. Documentos considerados.-**

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

| Documento | Número Publicación o Identificación                                                                                                                                                                                                                        | Fecha Publicación     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| D01       | GUIDO LUZI, MASSIMILIANO PIERACCINI, DANIELLE MECATTI, LINHSIA NOFERINI, GABRIELE GUIDI, FABIO MOIA, CARLO ATZENI, "Ground Based Radar Interferometry for Landslides Monitoring: Atmospheric and instrumental decorrelation Sources on experimental data". | Noviembre 2004        |
| D02       | DAVIDA LEVA, GIOVANI NICO, DARIO TARCHI, JOAQUIM FORTUNY-GUASCH, ALOIS J. SIEBER, "Temporal analysis of a landslide by means of a Ground-Based SAR Interferometer".                                                                                        | Abril 2003            |
| D03       | LINHSIA NOFERINI, MASSIMILIANO PIERACCINI, GUIDO LUZI, DANIELLE MECATTI, GIOVANI MACALUSO, CARLO ATZENI, "Ground-Based radar interferometry for monitoring unstable slopes".                                                                               | 22-24 de Mayo de 2006 |
| D04       | G. NICO, D. LEVA, G. ANTONELLO, D. TARCHI, "Ground-based SAR Interferometry for terrain Mapping: Theory and sensitivity analysis".                                                                                                                         | Junio 2004            |
| D05       | SABINE RODELSPERGER, GWENDOLYN LAÜFER, CARL GERSTENECKER, MATTHIAS BECKER, "Monitoring of displacements with ground-based microwave interferometry: IBIS-S and IBIS-L".                                                                                    | 15 de Junio de 2010   |

**2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración**

El documento objeto del informe se refiere a un método para monitorizar desplazamientos de terreno y de elementos creados por el hombre, usando datos de radar de apertura sintética terrestre (GBSAR).

El documento del estado de la técnica que se considera más próximo a la invención es D01. En dicho documento, nos encontramos con un método para monitorizar desplazamientos de terreno, basado en la interferometría de datos de radares de apertura sintética terrestre. Además de procesar las imágenes obtenidas por dicho radar con dicha metodología, el documento analiza los aspectos críticos de la decorrelación temporal y espacial, y a su vez hace un estudio del uso de la fotogrametría como técnica para evaluar la estabilidad mecánica y corregir la distorsión geométrica que se presenta.

Por lo tanto existen diferencias entre el documento D01 y la 1ª reivindicación de la solicitud, objeto de estudio. En concreto, en el método desarrollado en el documento D01 no se realiza una correlación global de imágenes preferiblemente sobre la amplitud de los píxeles seleccionados, ni tampoco se llevan a cabo las etapas de estimar efectos de reposicionamiento debidos a las diferencias entre la posición y la orientación del instrumento de medida entre la primera campaña de medidas y la segunda, ni la de estimar pares de desplazamientos para ambas campañas, para la conversión de dichas desviaciones de desplazamientos expresadas en píxeles en desplazamientos reales expresadas en unidades de desplazamiento.

Teniendo en cuenta esto, parece que no sería evidente para un experto en la materia que partiendo de dicho documento D01 se llegara a la invención propuesta en la 1ª reivindicación de la solicitud, y por lo tanto dicha invención poseería novedad y actividad inventiva.

Con respecto al resto de reivindicaciones 2ª a 12ª, puesto que todas dependen directamente o indirectamente de la 1ª reivindicación, podríamos decir que también presentarían novedad y actividad inventiva.

Por otro lado, el resto de documentos D02 a D05, que también emplean la interferometría para estimar desplazamientos a partir de datos de radares de apertura sintética terrestre, análogamente al documento D01, reflejarían el estado de la técnica general, y tampoco cuestionarían la novedad ni la actividad inventiva de la solicitud objeto de estudio.

A modo de resumen, podríamos concluir que los documentos D01 a D05, no afectarían a la novedad ni a la actividad inventiva, tal cual es descrita en las reivindicaciones 1ª a 12ª del documento presentado por el solicitante, y por lo tanto la patentabilidad de la invención no se vería cuestionada conforme a los artículos 6 y 8 de la ley 11/86 de patentes.