



ugr | **Universidad
de Granada**

E.T.S. de **Caminos, Canales y Puertos**

Departamento de **Ingeniería Civil**

Área de **Ingeniería del Terreno**

**DETERMINACIÓN DE MOVIMIENTOS
VERTICALES DEL TERRENO MEDIANTE
TÉCNICAS DE INTERFEROMETRÍA RADAR
DInSAR**

TESIS DOCTORAL

MARÍA PAZ FERNÁNDEZ OLIVERAS

Granada, Julio de 2009

Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: M^a Paz Fernández Oliveras
D.L.: GR. 3473-2009
ISBN: 978-84-692-5862-0

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha realizado gracias a la concesión de becas, ayudas y proyectos de I+D que han financiado parte del coste del trabajo realizado.

En primer lugar la concesión de una beca a la doctoranda de Formación de Personal Universitario (FPU), del Ministerio de Educación de España (MEC) en el año 2004, con una duración de 4 años.

Las estancias en el Instituto de Geomática de Barcelona han estado en parte financiadas por las ayudas para estancias en centros de investigación del Plan Propio de la Universidad de Granada, del año 2005 y el MEC, de los años 2005 y 2006.

Las imágenes seleccionadas se adquirieron en el marco del proyecto Cat1-1382 de la Agencia Espacial Europea (ESA).

Los estudios se han realizado gracias a los proyectos siguientes: Proyecto de Investigación y Desarrollo Tecnológico (I+D) del MEC REN2002-12726-E (2003-2005), Proyecto del Plan Nacional De Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica. 2004-2007 (I+D+I) del MEC CGL2005-03332 (BTE), Proyecto de Investigación de Excelencia de la Junta de Andalucía 2006 P06-RNM 02125.

Quiero agradecer al grupo de trabajo de la Unidad de Teledetección Activa del Instituto de Geomática, por su ayuda, soporte y colaboración en mi formación práctica y en el tratamiento y procesado de imágenes RADAR durante las estancias realizadas.

Agradecer también a los miembros del Grupo de investigación RNM-121, del Plan Andaluz de Investigación (PAI), su colaboración en la interpretación de los resultados del análisis DInSAR de las zonas de estudio.

Agradezco especialmente a los directores de esta tesis por su guía y consejos en la realización de mi investigación, y por compartir conmigo sus valiosos conocimientos.

A mi familia, en especial a mis padres y mi hermana por su apoyo constante y sus siempre acertadas palabras de ánimo.

Finalmente agradezco muy especialmente a Alberto, mi marido, su paciencia, su comprensión, sus gestos de aliento, su positivismo contagioso y las renunciaciones que ha realizado por compartir mi tiempo con este trabajo.

Hay dos maneras de difundir la luz... ser la lámpara que la emite,
o el espejo que la refleja.

Lin Yutang (1895-1976) *Escritor y filólogo chino.*

RESUMEN

La interferometría diferencial (DInSAR) es una técnica basada en imágenes de satélite RADAR que estudia deformaciones del terreno a partir interferogramas. En los interferogramas se recogen las diferencias de fases entre las dos imágenes que los forman y que pueden deberse a las formas del terreno y su desplazamiento.

Se ha realizado el análisis y cuantificación de deformaciones del terreno en la provincia de Granada mediante esta técnica, aplicada por primera vez en Andalucía. El estudio ha cubierto un periodo de 7 años (1993-2000), utilizando imágenes de los satélites ERS1 y ERS2 y sobre dos comarcas de características diferentes. Los resultados obtenidos se han integrado en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para su análisis e interpretación. La primera comarca de estudio es la Cuenca del Río Guadalfeo, al sur de la provincia, donde existen gran cantidad de movimientos de ladera inventariados por el grupo de investigación RNM-121, y de cuya actividad, establecida a partir de observaciones geomorfológicas, no se disponía de datos cuantitativos. Se seleccionaron 14 zonas con deslizamientos, de las cuales se obtuvieron resultados en tres de ellos, que expresan las tasas de desplazamiento anual, dentro de regímenes de actividad extremadamente lenta. Concretamente las tasas de deformación en el deslizamiento de la Serreta de Tablones alcanzan un máximo de 6mm/año, en Albuñuelas 13mm/año y en el Barranco de Mezquerina más de 7mm/año. En el resto se han analizado las causas de la falta de resultados relacionadas con las limitaciones de la técnica respecto a las características de las zonas. Además, en el caso de Albuñuelas el análisis y discusión de los resultados llevó a descartar la hipótesis inicial de la existencia de un deslizamiento. Tras la realización de estudios complementarios para su correcta interpretación, los desplazamientos se han atribuido a asientos diferenciales. En el caso del Barranco de Mezquerina, la superficie sobre la que se han obtenido resultados es muy reducida, lo

cual unido a la ausencia de evidencias de procesos locales de inestabilidad activa reciente y la presencia en la zona de deformación estimada con DInSAR de materiales con yesos, hace que se haya descartado como causa de la deformación la actividad de un deslizamiento y más bien podría asociarse a la disolución de yesos del sector, aunque no se ha podido confirmar al encontrarse la zona afectada en una propiedad privada inaccesible. En el deslizamiento traslacional de La Serreta de Tablones, los resultados DInSAR cubren la mayor parte de la masa del deslizamiento, con una distribución muy homogénea como corresponde a los deslizamientos planares.

La segunda comarca incluye a la ciudad de Granada y su Área Metropolitana, donde se desconocía la existencia de procesos de subsidencia, por lo que la aplicación de la técnica DInSAR ha constituido una herramienta de detección de las deformaciones verticales. Se han detectado dos zonas subsidentes, al Oeste (Santa Fe) y al Sudeste (Otura), con estimaciones de las tasas de deformación anual máximas de 8 mm/año y 12 mm/año respectivamente. En estos casos los valores de desplazamiento se relacionan con procesos de subsidencia vinculados a la extracción de agua subterránea.

Se describen detalladamente las fases de la metodología empleada, previas a la aplicación de la técnica (PREDDInSAR), de aplicación de la técnica DInSAR y posterior (POSTDInSAR). Parte de la metodología empleada no se había aplicado con anterioridad al estudio de procesos de deformación asociados a movimientos de ladera, por lo que esta investigación ha contribuido a su validación.

Finalmente se exponen las conclusiones, que abarcan aspectos relacionados con la técnica y su aplicación a los distintos tipos de deformaciones del terrenos analizadas, la metodología, la integración de resultados DInSAR en un SIG, las ventajas y limitaciones de la técnica en el estudio de movimientos de ladera y subsidencias, así como la propuesta de líneas de trabajo futuro.

ÍNDICE GENERAL DE LA TESIS

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL.....	6
1.2. CONTENIDO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	11
2. REVISIÓN DE CONOCIMIENTOS PREVIOS.....	13
2.1. PROCESOS DE DEFORMACIÓN DE TERRENOS.....	13
2.1.1. PROCESOS TECTÓNICOS Y FALLAS ACTIVAS.....	13
2.1.2. MOVIMIENTOS DE LADERA.....	15
- Clasificación	15
- Actividad	18
- Desarrollo	20
- Tamaño	21
- Velocidad	22
- Diacronía	22
- Intensidad	23
- Capacidad Destructiva	24
- Monitorización de deslizamientos	26
<u>Medidas en la superficie de la masa movilizada</u>	27
<u>Medidas en sondeos</u>	28
2.1.3. SUBSIDENCIAS.....	30
- Clasificación	30
- Medida y control de áreas subsidentes	33

2.2. TÉCNICAS RADAR APLICADAS AL CONTROL DE DEFORMACIONES DEL TERRENO.....	34
2.2.1. FUNDAMENTOS DE SAR Y DInSAR.....	34
- Nociones sobre las imágenes RADAR.....	34
<u>Características de las imágenes SAR: Distorsiones.....</u>	<u>34</u>
<u>Características de las imágenes SAR: amplitud y fase.....</u>	<u>37</u>
- Interferometría SAR (InSAR) y la Interferometría Diferencial (DInSAR).....	38
- Interferometría Diferencial Avanzada (A-DInSAR) y las técnicas Multi-interferograma.....	41
<u>Técnica Small Baseline DInSAR (SBAS).....</u>	<u>42</u>
<u>Técnica Interferometric Point Target Analysis (IPTA).....</u>	<u>43</u>
<u>Técnica Coherent Pixels Technique (CPT).....</u>	<u>44</u>
<u>La técnica de los Permanent Scatterers (PS).....</u>	<u>45</u>
<u>La técnica de Stable Point Network (SPN).....</u>	<u>45</u>
2.3. ANTECEDENTES.....	47
2.3.1. ORÍGENES Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA TÉCNICA DInSAR.....	47
2.3.2. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DInSAR AL ESTUDIO DE SUBSIDENCIAS.....	52
2.3.3. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DInSAR AL ESTUDIO DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA.....	58
3. OBJETIVOS.....	64
3.1. OBJETIVOS GENERALES.....	64
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	64

4. METODOLOGÍA EMPLEADA.....	65
4.1. PREDInSAR.....	66
4.1.1. Análisis de la viabilidad del estudio con la técnica DInSAR.....	66
<u>Características del Proceso</u>	66
Extensión del movimiento.....	66
Intervalo Temporal.....	67
Velocidad.....	68
Tipo de desplazamiento.....	69
Características locales.....	69
Orientación y pendiente de las laderas y su entorno.....	69
<u>Datos e Imágenes disponibles</u>	71
Información adicional.....	71
Características de las imágenes SAR.....	71
<u>Metodología DInSAR a emplear</u>	72
Pila de interferogramas.....	72
4.1.2. Selección de Imágenes.....	73
4.2. DInSAR.....	74
4.2.1. Fase General: elaboraciones básicas.....	76
4.2.2. Fase Específica: estimación de la velocidad de deformación.....	78
- <u>El software IDEG en la Fase Específica: la obtención de la velocidad de deformación</u>	80
1.-Cálculo de aristas y su red.....	80
2.-Reordenación.....	82
3.-Integración.....	82
- <u>La Función Gamma γ</u>	83
- <u>Estimación del diferencial de la velocidad y el error topográfico diferencial</u>	83
4.3. POST DInSAR.....	85

5. FASE EXPERIMENTAL.....	86
5.1. PRE DInSAR.....	88
5.1.1. Selección de imágenes.....	88
- Fase A: Selección de un conjunto de imágenes descendentes.....	89
- Fase B: Selección imágenes ascendentes.....	90
5.1.2. Viabilidad del estudio de los movimientos de ladera.....	91
5.2. DInSAR.....	97
5.2.1. Fase General: realización de los interferogramas diferenciales.....	97
5.2.2. Fase Específica. Aplicación del software para la estimación de la velocidad de deformación.....	104
- <u>Criterios de selección de píxeles candidatos</u>	107
- <u>Aplicación del software para la obtención de velocidad de deformación</u>	109
5.2.3. Resultados obtenidos en la fase DInSAR.....	117
5.3. POST DInSAR.....	119
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	121
6.1. CUENCA DEL RÍO GUADALFEO.....	122
6.1.1. <u>La Serreta de Tablones</u>	123
6.1.2. <u>Albuñuelas</u>	129
6.1.3. <u>Casos no concluyentes</u>	136
- Barranco de Mezquerina	138
6.2. GRANADA- ÁREA METROPOLITANA.....	141
6.2.1. <u>Santa Fe</u>	143
6.2.2. <u>Otura</u>	148

7. CONCLUSIONES.....	156
7.1. SOBRE LA TÉCNICA Y SU APLICACIÓN A LOS DISTINTOS TIPOS DE DEFORMACIONES DEL TERRENO.....	158
7.2. SOBRE LA METODOLOGÍA.....	159
7.3. SOBRE LA INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS EN UN SIG.....	160
7.4. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA TÉCNICA EN EL ESTUDIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA Y SUBSIDENCIAS.....	160
8. LINEAS DE TRABAJO FUTURO.....	165
8.1. AMPLIACIÓN DEL HORIZONTE TEMPORAL DEL ESTUDIO EN LOS MOVIMIENTOS YA ANALIZADOS.....	165
8.2. ANÁLISIS DE OTRAS ZONAS DE ANDALUCÍA.....	167
8.3. AVANZAR EN LOS ESTUDIOS DE RIESGOS NATURALES ELABORANDO MAPAS DE PELIGROSIDAD.....	167
9. BIBLIOGRAFÍA.....	168
10. ANEXOS.....	193
10.1. ANEXO 1: LISTADO DE LOS INTERFEROGRAMAS USADOS...	193
10.2. ANEXO 2: TABLAS CON LA REFERENCIAS DE ARTÍCULOS CONSULTADOS SOBRE FALLAS ACTIVAS Y SUBSIDENCIAS.....	196
10.3. ANEXO 3: ETAPAS DE LA FASE GENERAL DInSAR REALIZADAS CON EL PROGRAMA DIAPASON PARA EL CÁLCULO DE LOS INTERFEROGRAMAS DIFERENCIALES.....	201
10.4. ANEXO 4: PUBLICACIONES DE LA DOCTORANDA.....	205

1.-INTRODUCCIÓN

1.1.- JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE DE LA TESIS DOCTORAL

La doctoranda se incorporó al grupo de investigación RNM 121 en Enero de 2004, tras la obtención de una beca FPU del MEC, respaldada por el Profesor Chacón, para la realización de una Tesis doctoral sobre la determinación, medida y control de deformaciones del terreno mediante técnicas cartográficas, faltando concretar las técnicas a utilizar y el ámbito geográfico del estudio.

La concesión al Director de la Tesis del proyecto I+D del Ministerio de Educación (MEC) REN2002-03366: “Deslizamientos de ladera y tectónica activa de la cuenca del río Guadalfeo: vulnerabilidad y riesgos derivados” (01 enero 2003- 31 Diciembre 2005), orientó el ámbito del estudio a una cuenca bastante extensa y con gran cantidad de deslizamientos que en parte habían sido estudiados en proyectos anteriores y las Tesis Doctorales de los profesores Fernández del Castillo y El Hamdouni, presentadas en 2002 y realizadas igualmente bajo la dirección del Profesor Chacón. Simultáneamente se iniciaba la Tesis Doctoral de Jorge Jiménez Perálvarez para completar el estudio e inventario de los movimientos de ladera de la Cuenca del Río Guadalfeo.

Dada la formación previa de la doctoranda como Ingeniera en Geodesia y Cartografía, que supone el conocimiento y la capacitación para el estudio de diferentes técnicas de observación indirecta del terreno, dentro de las cuales se encuentra la teledetección, se planteó la oportunidad de abordar la aplicación de métodos indirectos de observación mediante la Interferometría Diferencial RADAR (DInSAR), para estimar valores de la deformación inducida por el movimiento del terreno, sea cual sea su origen geológico o geotécnico. La técnica había alcanzado un importante desarrollo práctico después de un relativamente largo proceso previo de avances y mejoras, que permitía el estudio regional de las deformaciones del terreno de una forma asequible, desde el punto de vista económico y operativo, y riguroso en cuanto a la precisión y fiabilidad de los resultados, condiciones ambas de gran importancia para estudios del terreno en los que, durante décadas, la determinación de las deformaciones ha requerido fuertes inversiones en técnicas de medida directa en superficie o sondeo y largos periodos de tiempo para la obtención de resultados.

De esta forma el Profesor Chacón contactó con el Profesor José Antonio Gili, Catedrático del Área de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña e Investigador en el Instituto de Geomática, quién amablemente facilitó el contacto con el grupo de trabajo de la Unidad de Teledetección Activa del Instituto de Geomática, dirigido por el Doctor Michele Crosetto, Co-Director de la Tesis, lugar donde se ha desarrollado el procesado de las imágenes RADAR de este trabajo.

Para poder realizar esta aplicación fue necesario adquirir una serie de conocimientos teóricos y prácticos acerca de las imágenes RADAR, la interferometría y finalmente la interferometría diferencial, así como alcanzar una formación específica y adecuada. Para ello, además de la lectura de numerosos documentos en formato papel y electrónico en diferentes webs como la de la Agencia Espacial Europea (ESA), la NASA y el Centro canadiense de teledetección (Canada Centre of Remote Sensing CCRS), la doctoranda realizó el módulo del Master Científico Internacional M.Sc. in Airborne Photogrammetry and Remote Sensing del Instituto de Geomática de Cataluña sobre Interferometría RADAR titulado "Interferometric Synthetic Aperture Radar. Airborne SAR" en Noviembre de 2004 y una estancia de un total de diez meses, en dos años sucesivos, para la capacitación en el software necesario.

Los estudios realizados, así como la obtención de imágenes RADAR de la ESA, fueron financiados por la Acción Especial del MEC de referencia REN2002-12726-E: "Aplicación de técnicas avanzadas de interferometría diferencial mediante imágenes radar de apertura sintética (SAR) a la evaluación de la actividad de movimientos de ladera en sectores de la cuenca del río Guadalfeo (Granada)" dirigida por el Profesor Chacón.

El hecho de que la metodología DInSAR específica utilizada (desarrollada por el Instituto de Geomática), tuviese una doble funcionalidad (como herramienta de cuantificación de zonas donde se conoce que existen deformaciones del terreno y como herramienta para detección de deformaciones del terreno no identificadas previamente, en zonas extensas), hizo que el área de estudio se ampliara, analizando también la Depresión ocupada por Granada y su área metropolitana, aprovechando esa doble vertiente, para detectar nuevas zonas deformadas, y contrastar los resultados del análisis DInSAR en zonas llanas con intensa ocupación urbana en las que se desconocía la existencia de procesos de subsidencia, uno de los tipos de deformaciones del terreno a considerar.

Todo este bagaje se resume en la Figura 1.1, que expone un esquema de la evolución desde el proyecto inicial de la Tesis hasta su realización, junto a los aspectos que han ido influyendo en este proceso.

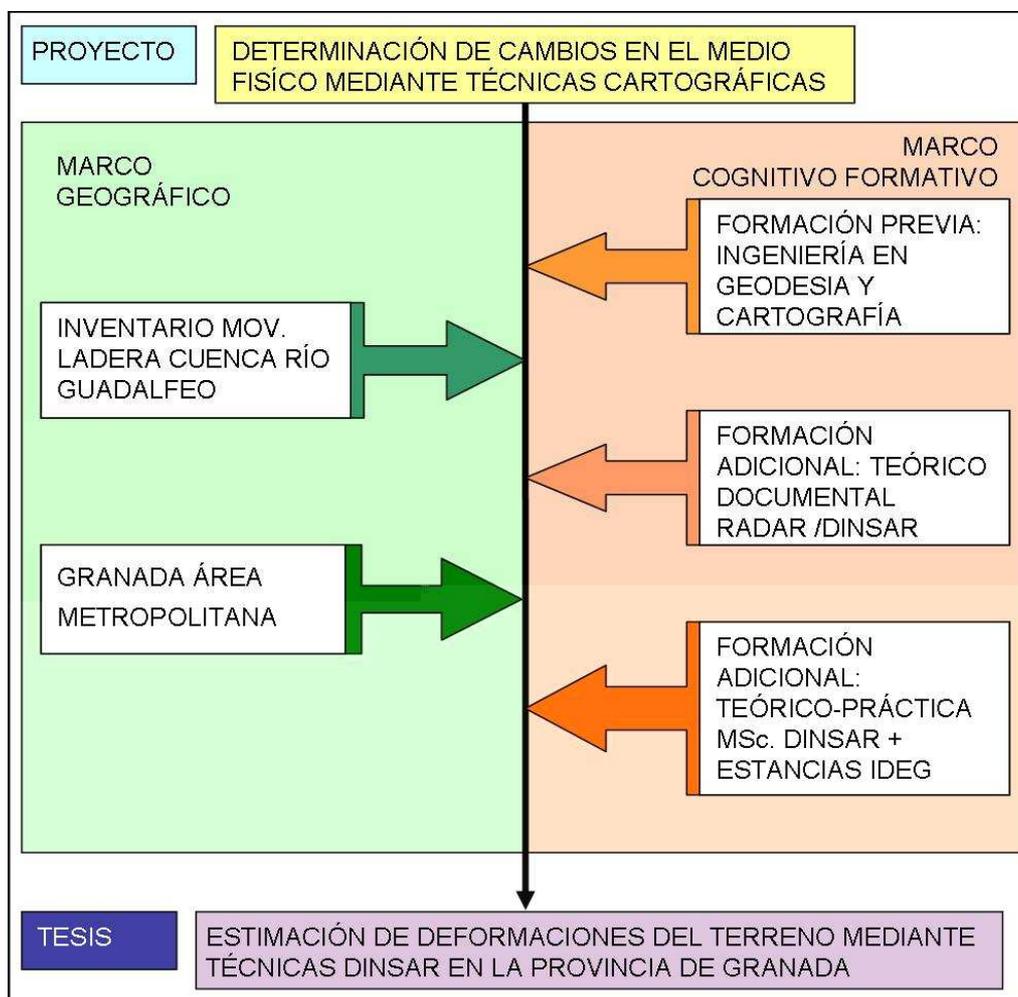


Figura. 1.1: esquema de la evolución desde el proyecto hasta la tesis

Enfoque de la investigación

La investigación realizada incorpora líneas de investigación propias de la Ingeniería del Terreno y de la Geomática, relacionadas entre sí en diversos aspectos y aplicaciones, como las que se exponen en esta memoria. (Figura 1.2).

Desde el punto de la Ingeniería del Terreno se trata de aplicar una serie de técnicas de teledetección novedosas, propias de la Geomática, en auge para el estudio y la estimación de valores de deformación del terreno en diferentes escenarios o contextos. Más concretamente, la aplicación de la Interferometría Diferencial de imágenes RADAR (DInSAR) a la región central de la Cordillera Bética, comprendida entre Motril

y Jaén, ha permitido identificar zonas sometidas a deformaciones activas en relación con movimientos de ladera y procesos de subsidencia urbana, en contextos muy diferentes. Por una parte la expansión del tejido urbano y la constitución de un área metropolitana como es la de Granada y por otra la inestabilidad de vertientes en la cuenca del Guadalfeo. Así mismo ha permitido contribuir al debate geotécnico en zonas complejas en las que los datos del subsuelo son insuficientes o no están disponibles, y los resultados del análisis DInSAR han dado respuestas decisivas para el diagnóstico del problema geotécnico, como ha sido el caso del vuelco progresivo de viviendas en Albuñuelas. Finalmente, ha suministrado datos de deformaciones verticales cuya explicación está aún pendiente de estudio y constituye el objeto de futuros desarrollos de la investigación, como son los casos de sectores próximos a Lanjarón y Torvizcón o diversas pequeñas zonas del Área Metropolitana de Granada.

Así pues desde la Ingeniería. del Terreno, a través de esta Tesis Doctoral, se ha puesto a punto una técnica propia de la Geomática que permite conocer estimaciones de velocidades de deformación del terreno en un intervalo temporal bastante amplio (desde 1993), que por su magnitud (milímetros al año), no es posible apreciar a simple vista y con un coste económico bajo respecto a las opciones existentes de instrumentación “in situ”. La técnica permite, además, afrontar gran diversidad de espacios de diferentes características, como amplias áreas urbanas o metropolitanas, en las que no se hayan identificado deformaciones del terreno previas (modalidad 1) o pequeños sectores diseminados en los que se conoce a priori la existencia de deformación del terreno, pero no ha sido posible su cuantificación, como es el caso de movimientos de ladera inventariados en la Cuenca del Guadalfeo (modalidad 2).

Desde el punto de vista de la Geomática el estudio presenta una nueva metodología DInSAR, que se aplica a varios campos. Con ello se ha podido comprobar su potencialidad para estudiar diferentes tipos de deformaciones del terreno.

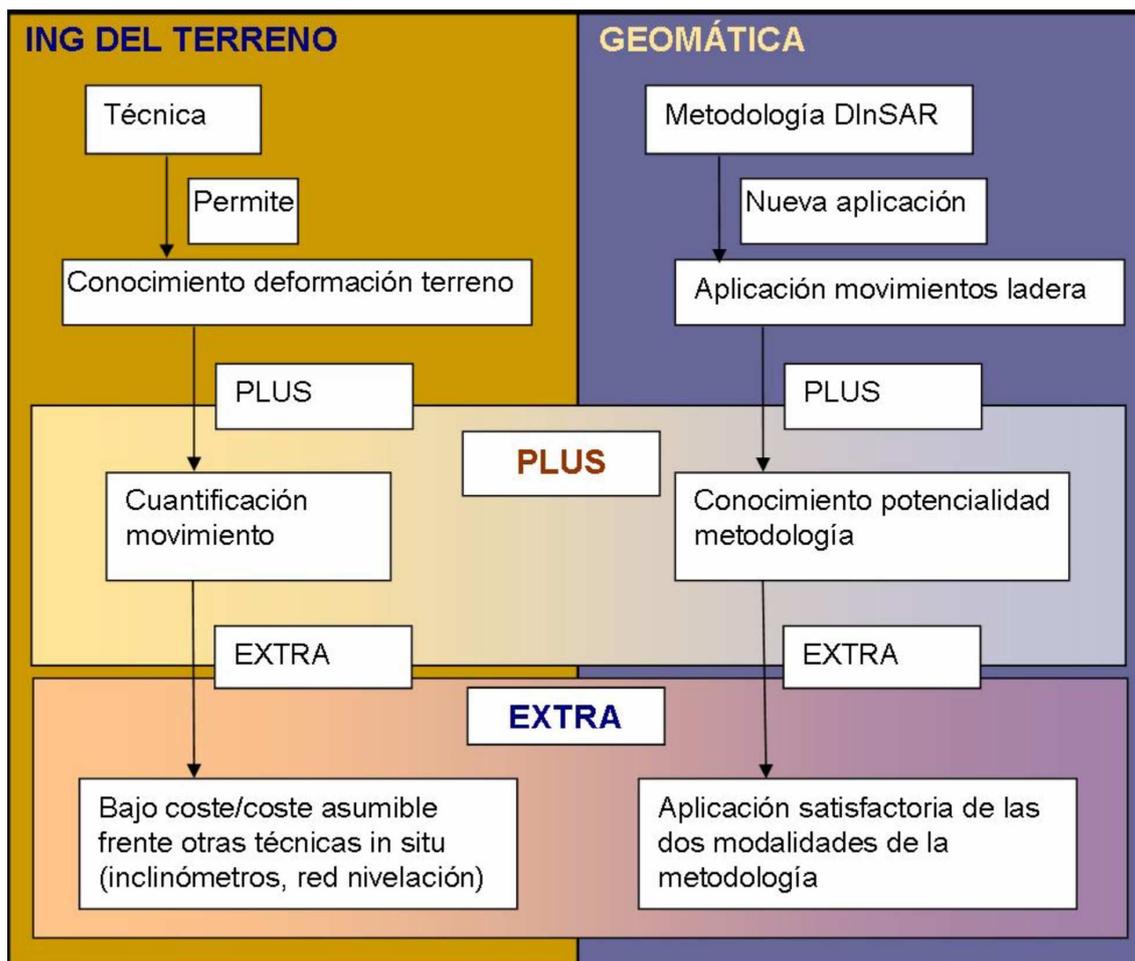


Figura 1.2: Esquema de los puntos de vista de la investigación

En resumen, mediante las zonas estudiadas se ha establecido la validez del método para el estudio de zonas relativamente amplias (del orden de varios cientos Km^2), en las que se desconocía previamente la existencia de deformaciones verticales, como el área metropolitana de Granada y también la estimación de valores de deformación en el estudio de los movimientos de ladera, una de las aplicaciones más recientes y complejas del DInSAR. Todo ello hace que los resultados de la investigación desarrollada en colaboración entre el Instituto de Geomática de Cataluña y la Universidad de Granada sea bastante novedosa y exitosa, que, como se mostrará en este estudio, demuestra una gran robustez y potencial de futuro del análisis con DInSAR, y ha permitido la publicación en la revista indexada *Engineering Geology* (Elsevier) de los primeros resultados obtenidos (Fernández et al, 2009), presentados previamente en diversos congresos internacionales y nacionales, recibiendo el Premio a la Mejor comunicación en I+D+I en el IV Congreso andaluz de Carreteras (ver Anexo 4).

1.2.-CONTENIDO DE LA INVESTIGACIÓN

En el **Capítulo 1** de Introducción se presentan los motivos de la realización de la tesis, sus enfoques y el alcance de las investigaciones realizadas, así como la descripción de forma concisa del contenido de los capítulos que forman de la presente tesis doctoral.

En el **Capítulo 2** se hace una revisión de los conocimientos previos, tanto sobre los procesos de deformación de terrenos como de las técnicas RADAR aplicada a estudio y control de las deformaciones. También se aborda, dentro del apartado de antecedentes, una revisión sobre los orígenes y evolución histórica de la técnica DInSAR, empleada para el estudio de los procesos de deformación del terreno, así como una revisión bibliográfica de la aplicación de esta técnica al estudio de subsidencias y movimientos de ladera, procesos presentes en las zonas de estudio de esta investigación.

En el **Capítulo 3** se exponen los objetivos marcados en la investigación, divididos en Generales y Específicos.

El **Capítulo 4** está dedicado a la Metodología empleada, detallando cada una de las etapas que la forman y dentro de ellas los pasos que comprende, desde los estudios previos a la aplicación de la técnica (Pre DInSAR), la etapa DInSAR de cálculo de interferogramas diferenciales (Fase General) y obtención de tasas de deformación del terreno (Fase Específica) y la etapa posterior PostDInSAR de integración e interpretación de los resultados.

El **Capítulo 5** recoge la Fase Experimental, que expone la aplicación de la metodología a las zonas de estudio.

En el **Capítulo 6** se incluyen los resultados obtenidos en los distintos casos de las zonas de estudio y su discusión.

El **Capítulo 7** se dedica a las conclusiones obtenidas, haciendo incidencia en la técnica y su aplicación a las deformaciones del terreno, la metodología, la integración de los resultados en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y las ventajas y limitaciones de la técnica DInSAR en el estudio de movimientos de ladera y subsidencias.

En el **Capítulo 8** se plantean posibles líneas de trabajo futuro abiertas con esta investigación.

El **Capítulo 9** recoge las referencias bibliográficas contenidas en la presente Tesis Doctoral.

Finalmente en el **Capítulo 10** se anexan informaciones de interés que, por su amplitud o especificidad, no han sido introducidas en el cuerpo del texto para facilitar la lectura y hacerla lo más fluida posible.

2.- REVISIÓN DE CONOCIMIENTOS PREVIOS

2.1.-PROCESOS DE DEFORMACIÓN DE TERRENOS

En este apartado se presentan aspectos relacionados con los procesos de deformación de terrenos que pueden presentarse en las zonas de estudio.

2.1.1.-PROCESOS TECTÓNICOS Y FALLAS ACTIVAS

Para la definición de los procesos geodinámicos que afectan a la superficie de la corteza, en primer lugar se consideran los procesos de origen tectónico. En particular se prestó atención a los levantamientos y hundimientos de origen tectónico, y al posible efecto de las fallas activas.

Por ello, se realizó un análisis basado en la comparación de los datos de gradiente de movimiento característicos de los procesos mencionados, con los obtenidos en el análisis DInSAR, además de tener en cuenta el contexto geológico y los usos del territorio en las zonas afectadas.

Los procesos mencionados se caracterizan de forma determinante por la escala temporal en que se producen, ya que suelen ser extremadamente lentos y muy dilatados en el tiempo, traspasando la escala temporal significativa para la sociedad. Esto dificulta su detección y, mucho más aún, la cuantificación de las deformaciones, cuyos gradientes se encuentran por debajo de los límites de precisión de los instrumentos disponibles para su medición.

De hecho en Gil et al (2002) y Ruiz et al (2003), después de realizar campañas de GPS durante los años 1999 y 2000 en la zona Sureste del área metropolitana de Granada y establecer una red geodésica en la Falla de Padul, observaciones geodésicas al SE de Granada, durante los años 1999-2000-2001, y dos perfiles de nivelación cortando la Falla de Granada, concluyen que “las tasas (de deformación) son pequeñas. Para detectar estas pequeñas tasas, se deben realizar observaciones durante un periodo de tiempo más largo, probablemente una década” (Gil et al, 2002);”en la red geodésica de la Falla de Padul, las diferencias de las coordenadas verticales entre los sitios están en el mismo orden de magnitud que el error de propagación. [...] las bajas tasas, próximas a la precisión de las técnicas geodésicas, y las limitaciones del corto espacio de tiempo de observación hacen estas medidas cuestionables” (Ruiz et al, 2003).

Esta conclusión bien fundamentada y en el área de estudio permitió descartar que los resultados obtenidos tuvieran relación con movimientos verticales profundos, como se verá en el Capítulo 6 de Resultados y Discusión.

Otro proceso geodinámico de origen profundo es el asociado al funcionamiento de las fallas geológicas, definidas como fracturas o sistemas de fracturas a lo largo de las que se producen movimientos relativos entre las dos partes o bloques de corteza afectada (Keller and Pinter, 1996).

Además, en las zonas en las que se producen procesos tectónicos, existen fallas activas. Estas se definen como aquellas que se han movido en los últimos 10.000 años (Keller and Pinter, 1996). Las deformaciones asociadas a las *fallas activas* se producen durante *movimientos asísmicos* y *movimientos sísmicos*. Los *movimientos asísmicos* de las fallas activas son desplazamientos muy lentos con velocidades de escasos milímetros por año, que se conocen como reptación de la falla y se desarrollan de forma más o menos continua durante períodos de tiempo actuales. Los *movimientos sísmicos* de las fallas activas producen desplazamientos súbitos a lo largo de las fallas, que se expresan en las formas del terreno, en roturas de elementos dispuestos sobre ella o en nuevas fallas del terreno asociadas a las principales. Estos movimientos se producen durante terremotos de magnitud considerable, como consecuencia de la liberación de energía provocada por el movimiento relativo de los materiales implicados y suelen ser relativamente frecuentes.

Si consideramos el estudio de estos procesos (Figura 2.1 y Anexo 2), las velocidades que se han estimado con diferentes tipos de técnicas apenas superan los 6 mm/año de tasa máxima en los casos más extremos (Van Arsdale, 2000), estando los valores más frecuentes en trono a los 1,5mm/año, con lo que la técnica DInSAR tiene una aplicación limitada en estos procesos dada la baja velocidad de los desplazamientos.

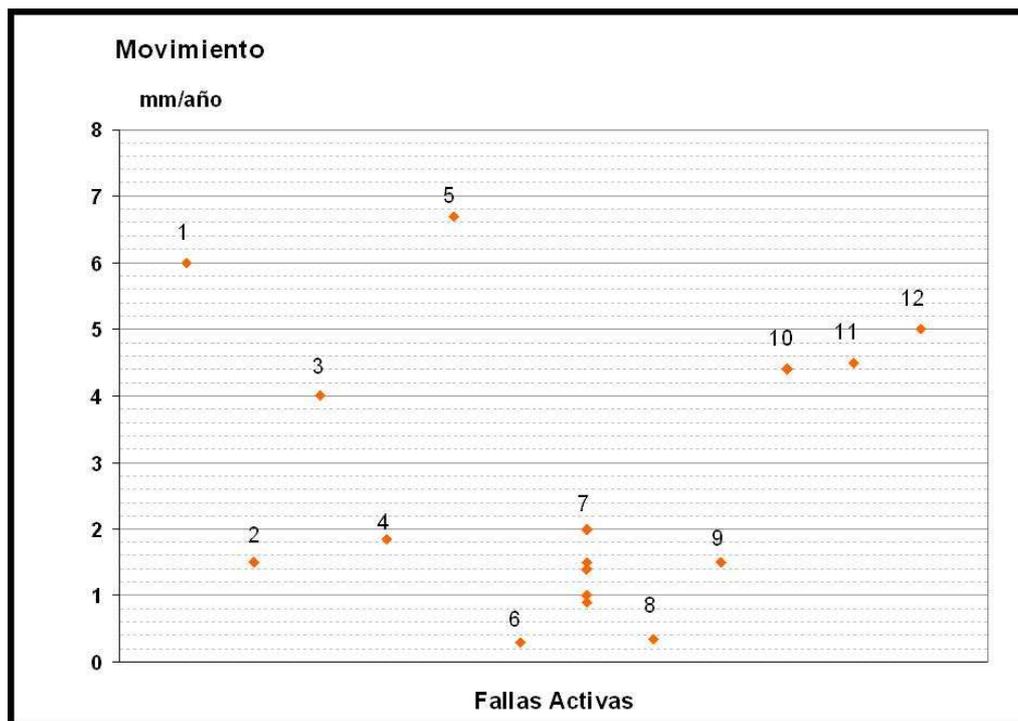


Figura 2.1: Gráfico que muestra las tasas de movimiento de fallas activas estudiadas en distintos trabajos. El número indica la referencia del trabajo correspondiente a cada estudio que se encuentran recogidos en el Anexo 2.

2.1.2.-MOVIMIENTOS DE LADERA

Denominamos con el término de movimientos de ladera a todos los procesos que ocurren en la dinámica de vertientes. Aunque no existe una unanimidad en la terminología en castellano, hemos adoptado aquella que considera el término movimientos de ladera para denominar cualquier tipo de movimiento en general, siendo los deslizamientos considerados como un tipo dentro de éstos.

Los deslizamientos son desplazamientos en masa que se enmarcan dentro de los procesos de dinámica de vertientes.

Cruden (1991) propone definir un deslizamiento como: “un movimiento de roca, tierra y detritos ladera abajo”.

A su vez, las laderas pueden ser definidas como toda superficie natural inclinada uniendo otras dos, caracterizadas por diferentes energías potenciales gravitacionales (Stochalak, 1974).

Clasificación

En cuanto a la clasificación de los movimientos de ladera, existen gran cantidad de

ellas, la mayoría de las cuales se basan en la clasificación de Varnes 1978, como la realizada por Cruden y Varnes 1996, si bien la clasificación de Varnes 1978 es considerada la clasificación oficial de la Internacional Association of Engineering Geology and Environment - IAEG.

La clasificación divide los movimientos de ladera, por un lado en función del tipo de movimiento experimentado, y por otro según el tipo de material movilizado (Tabla 2.1). Los tipos de movimientos se agrupan en caídas, vuelcos, deslizamientos, expansiones laterales y flujos. Los materiales se agrupan simplemente en rocas y suelos.

Caídas: comienza con el despegue de suelos o rocas desde una ladera de fuerte pendiente a lo largo de una superficie donde no tiene lugar cizalla. El material desplazado desciende fundamentalmente por el aire. Es un tipo de movimiento muy rápido o extremadamente rápido.

Vuelcos: es una rotación hacia fuera de la ladera de una masa de suelo o roca sobre un punto o eje por debajo del centro de gravedad de la masa desplazada. A veces están propiciados por la acción de la gravedad sobre materiales situados por encima de la ladera de la masa desplazada y otras veces por agua o hielo almacenados en las grietas de la masa. Los vuelcos a veces pueden derivar en caídas o deslizamientos dependiendo de la geometría de masa movilizada, la geometría de la superficie de separación y la orientación y extensión de las discontinuidades activas. La velocidad puede ser desde extremadamente lenta a extremadamente rápida, acelerándose a veces a lo largo del movimiento.

Expansiones laterales: movimientos de bloques de rocas o masas de suelo sobre materiales más blandos a lo largo de una gran extensión de poca pendiente.

Flujos: son movimientos de ladera en los que se produce una deformación del material movilizado y que normalmente van asociados a la presencia de agua. Existen diferentes tipos dentro de ellos en función de los materiales que se muevan y su velocidad varía de la extremadamente lenta de la reptación a la extremadamente rápida.

Los movimientos de ladera **complejos** son aquellos en los que se producen varios tipos de movimientos combinados. Los movimientos múltiples son aquellos en los que se produce un mismo tipo de movimiento varias veces en sucesión de forma encadenada.

Tipo de movimiento		Tipo de material		
		Macizos rocosos	Suelos Geotécnicos	
			Finos	Gruesos
Caídas de rocas		Caídas de rocas	Caída de derrubios	Caída de tierra
Vuelcos		Vuelco de rocas	Vuelcos de derrubios	Vuelcos de tierra
Deslizamientos	traslacionales	Deslizamientos de rocas	Deslizamientos de derrubios	Deslizamientos de tierras
	rotacionales			
Expansión lateral		Expansión de rocas	Expansión de derrubios	Expansión de tierras
Flujos		Flujo de rocas	Flujo de derrubios	Flujo de tierras
		(reptación profunda)	(reptación de suelos)	
Complejos				

Tabla 2.1: clasificación de los movimientos de ladera según Varnes, 1978.

Deslizamientos:

Según esta clasificación se pueden distinguir los deslizamientos traslacionales y los rotacionales en función de cómo sea la geometría de la superficie de rotura de los mismos. En los deslizamientos traslacionales o planares dicha superficie es un plano de inclinación prácticamente constante, mientras que en los rotacionales esta superficie es curva. La aparición de una u otra clase viene condicionada por el tipo de materiales y su comportamiento frente al sistema de fuerzas que actúa en él. Así los deslizamientos traslacionales suelen producirse sobre materiales heterogéneos con superficies de discontinuidad bien definidas que hacen que la fuerza predominante del sistema sea la que actúa desplazando la masa a lo largo de la superficie de la ladera en la dirección de máxima pendiente. En los deslizamientos rotacionales los materiales son homogéneos o macizos rocosos muy fracturados (Antoine, 1992), de forma que no hay una fuerza predominante en una de las 3 direcciones del espacio, produciéndose un giro de la masa por la superficie cóncava de rotura que genera una inclinación de la cabecera en contra de la pendiente.

Cuando los movimientos de ladera tienen una superficie de rotura con una geometría mixta (combinación de secciones curvas y planas) se denominan deslizamientos compuestos.

En un deslizamiento se pueden distinguir una serie de elementos que caracterizan su forma y dimensiones (Figura 2.2), cuya nomenclatura ha sido desarrollada por la Comisión del Inventario Mundial de Deslizamientos de Tierra de la UNESCO (WP/WLI 1990 b).

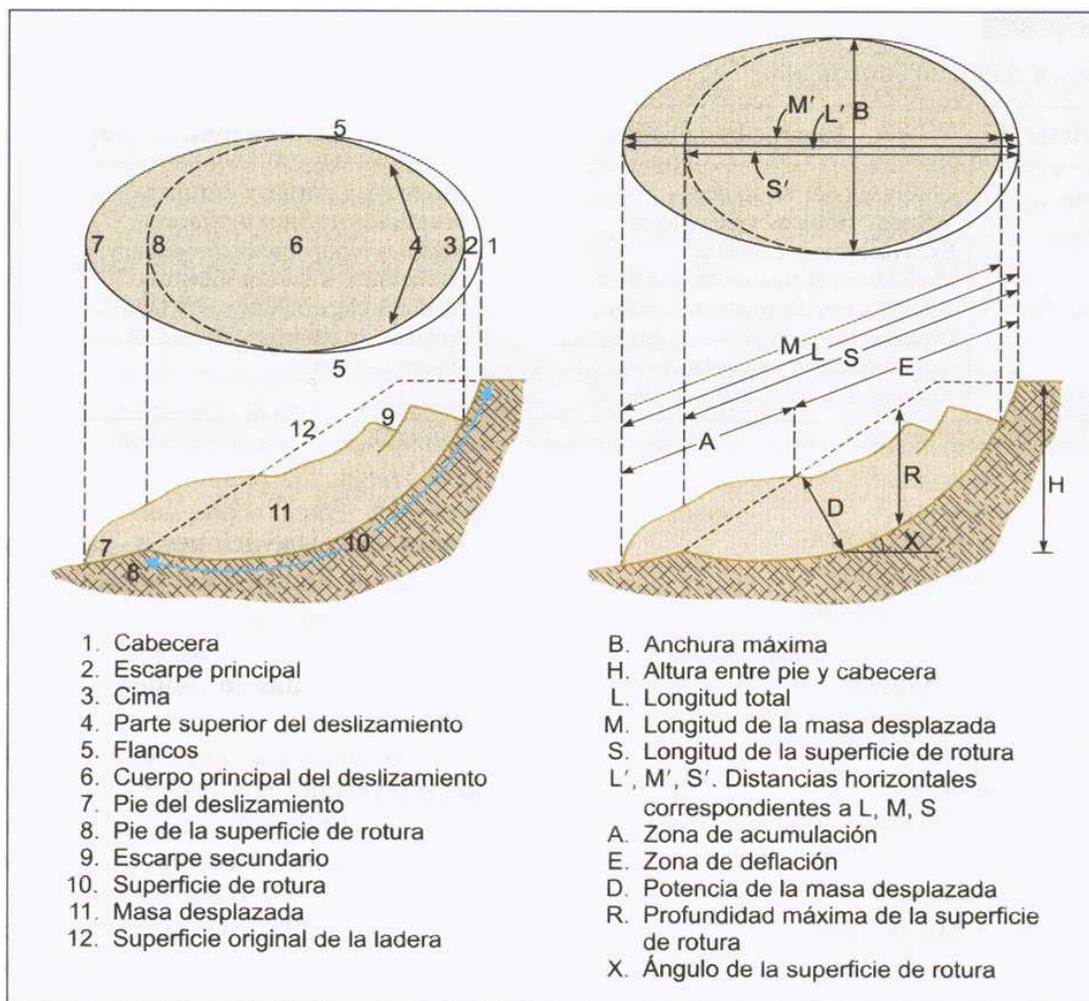


Figura 2.2: Elementos morfológicos y morfométricos de un deslizamiento (WP/WLI 1990 b).

Los deslizamientos también se pueden clasificar en función de su actividad y desarrollo, así como por su velocidad y su tamaño.

Actividad

A la hora de considerar la actividad de los deslizamientos tenemos que tener en cuenta

cuál es el sistema de observación que se ha usado o se está usando para clasificarlos (ocular, instrumental, etc), ya que cada uno de ellos tiene un umbral de percepción del movimiento distinto. Lo deseable sería que tuviésemos un sistema de percepción que pudiese detectar los movimientos más lentos que existen que son los de reptación.

Si consideramos su actividad podemos encontrar distintas clasificaciones de entre las cuales exponemos la recogida por Cruden y Varnes (1996) basada en la terminología propuesta por la UNESCO Working Party (WP/WLI 1990a, 1993a, 1993b) en los deslizamientos se pueden clasificar en (Figura 2.3):

Activos: son aquellos que se están moviendo en la actualidad, ya sean en su totalidad o en una parte (parcialmente activos).

Reactivados: deslizamientos que están actualmente activos después de pasar un tiempo inactivos.

Suspendidos: aquellos que se han movido en el último ciclo anual de estaciones pero que no se están moviendo actualmente.

Inactivos: son aquellos que no se han movido desde hace más de un ciclo anual estacional. Este estado se subdivide en

Dormidos: si las causas del movimiento permanecen apreciables.

Abandonados: si las causas ya no son apreciables o han cambiado.

Estabilizados: si las condiciones de la zona en la que se ha producido el deslizamiento se han cambiado artificialmente, haciendo que la zona sea estable.

Relictos: son los que se produjeron por condiciones geomorfológicas o climáticas diferentes a las actuales y que no permanecen activos.

En el caso de los climas semiáridos es muy frecuente el tipo de deslizamiento intermitente Chacón et al (1996), que se asimila a dormido o suspendido de la anterior clasificación, aunque su actividad no es claramente estacional.



Figura 2.3: Desplazamiento de un deslizamiento en diferentes estados de actividad. En Cruden y Varnes 1996, modificado por Jiménez, 2005.

Si consideramos la actividad desde el punto de vista cinemático, entonces podemos distinguir dos grupos diferentes de movimientos (Chacón, 2008 a):

- Monocrónicos
- Diacrónicos

Los movimientos monocrónicos suceden en un intervalo espacial y temporal concreto y determinado, generalmente corto, tras el cual cesa el movimiento definitivamente. Suelen ser la mayoría de los casos y pueden darse en todos los tamaños, aunque son más frecuentes en los de menor tamaño.

Los diacrónicos, sin embargo, suceden en intervalos temporales amplios, desde varios años a miles de años. Suelen darse en tamaños grande a excepcionalmente grande, e implican la persistencia de la inestabilidad de la ladera afectada a lo largo del tiempo.

Desarrollo

A cada etapa de actividad le corresponde un grado de desarrollo en función del tiempo transcurrido desde el inicio del deslizamiento. La fase de desarrollo de un deslizamiento se recogen en la Tabla 2.2 de Chacón et al (1996):

FASE	DESARROLLO DEL MOVIMIENTO	ACTIVIDAD	DAÑOS PRODUCIDOS Y POTENCIALES
PREPARATORIA O INCIENTE	Poco apreciable; cambios en manantiales, abombamientos locales, grietas dispersas, grietas de tracción en cabecera. <i>Puede durar mucho tiempo.</i>	Activo, velocidad variable, intermitente a permanente. Puede permanecer inactivo largo tiempo hasta nueva activación.	Distribución lineal de daños a estructuradas situadas sobre trazas de grietas o abombamientos. Potencial muy alto; según magnitud de la masa a movilizar y la trayectoria.
INICIO	Apreciables abombamientos; ruidos discontinuos, cambios topográficos, grietas de tracción en cabecera, trazas de escarpes; hundimientos, cabeceos suaves. <i>Duración, progresión y continuidad variables.</i>	Activo, velocidad variable, intermitente a permanente. Puede permanecer inactivo largo tiempo hasta nueva activación.	Distribución de áreas de daños en la masa que se sitúa alrededor de las grietas y abombamientos, incluyendo el frente. Potencial alto; según magnitud de la masa a movilizar y la extensión de la trayectoria.
DESARROLLO	Despliegue del escarpe, delimitación de la masa que desborda la base del plano de rotura; aparición de escarpes menores, hundimientos y cabeceo en cabecera, levantamiento en el frente. Avance de la masa ladera abajo. <i>Puede detenerse en cualquier momento. Duración variable.</i>	Activo, velocidad variable, intermitente a permanente. Puede permanecer inactivo largo tiempo hasta nueva activación.	Se extiende a toda la masa movilizada y a las zonas situadas bajo el frente y en la trayectoria que la masa ha recorrido. Potencial medio; la trayectoria restante y la zona de remonte posible.
AVANZADO	Desarrollo del escarpe principal y de los escarpes menores. Acumulación de la masa en la base de la ladera. Despliegue de bloques menores. Remonte del escarpe principal ladera arriba si es posible.	Activo, velocidad variable, intermitente a permanente. Puede permanecer inactivo largo tiempo hasta nueva activación.	Se extiende aún más según progresa la deformación de la masa, se amplía la zona de ruptura ladera arriba y se extiende la zona de desplazamiento de la masa. Potencial bajo; la mayor parte de los daños se han producido.
AGOTAMIENTO	Acumulación de la masa en el pie de la ladera y nueva pendiente media del perfil. Escarpe principal en divisoria o sin posibilidad de remontar. Demuebles de bloques menores. Inestabilidades locales. Estabilización parcial salvo excavaciones.	Poco activo, velocidad variable, intermitente a permanente. Puede permanecer inactivo largo tiempo hasta su fosilización o estabilización definitiva o hasta nueva activación por acción erosiva, recargas, desmontes o terremotos importantes.	Los daños se han producido en toda la extensión de la masa y el potencial de daños es mínimo. Posibles daños locales a transeséntes por reajustes de masas.

Tabla 2.2: Fases de desarrollo de los movimientos de ladera (Chacón et al, 1996)

Tamaño

En función del volumen de la masa movilizada se puede establecer una clasificación de los deslizamientos por su tamaño. Se presenta aquí la propuesta por Rodríguez et al, (1978) para la cartografía nacional española de movimientos de ladera promovida por el Ministerio de Obras Públicas (Tabla 2.3):

DESCRIPCIÓN	VOLUMEN
Pequeños	<50m ³
Moderados	50-500m ³
Grandes	500-5000m ³
Muy grandes	5000-50.000m ³
Excepcionales	>50.000m ³

Tabla 2.3: clasificación de los movimientos de ladera en función del volumen de material implicado.

Velocidad

Otro de los aspectos a tener en cuenta en el estudio y clasificación de los deslizamientos es la velocidad a la que se desplaza la masa. Una escala de velocidades muy usada se basa en Cruden y Varnes, (1996), y establece 7 niveles (Tabla 2.4):

Clase	Descripción	Velocidad (mm/seg)	Valores típicos	Daños probables (en movimientos monocrónicos)*
7	Extremadamente Rápido	Más de 5×10^3	Más de 5m/s	Violento y catastrófico. Número elevado de muertos. Destrucción de edificios por impacto de la masa deslizada.
6	Muy rápido	5×10^1 - 5×10^3	Entre 5m/s y 3m/min	Es difícil escapar. Algunos muertos. Destrucción de edificios y estructuras
5	Rápido	5×10^{-1} - 5×10^1	Entre 3m/min y 1.8m/h	Es posible escapar. Destrucción de edificios y estructuras
4	Moderado	5×10^{-3} - 5×10^{-1}	Entre 1.8m/h y 13m/mes	Algunas estructuras pueden mantenerse temporalmente
3	Lento	5×10^{-5} - 5×10^{-3}	Entre 13m/mes y 1.6m/año	Pueden aplicarse medidas correctoras. Las estructuras de los edificios pueden mantenerse.
2	Muy lento	5×10^{-7} - 5×10^{-5}	Entre 1.6m/año y 16 mm/año	Las estructuras permanentes no resultan dañadas en general
1	Extremadamente lento	Menos de 5×10^{-7}	Menos de 16 mm/año	Imperceptible si no es con instrumentación. Es posible la construcción con precauciones

Tabla 2.4: escala de velocidad de los movimientos de ladera. Fuente: Cruden y Varnes 1996.

*Aclaración del Prof. Chacón.

Diacronía

Hace referencia a la descripción de la sucesión de hechos característicos del movimiento a lo largo del tiempo y depende de longevidad y duración de un movimiento. La tabla 2.5 recoge una escala de diacronía propuesta por Chacón, 2008, refiriéndose al entorno temporal en el que se desarrollan los movimientos.

Escala	Grado	Diacronía (años)	Equivalencia
Contemporánea	I	$0-10^{-7}$	0-3.15s
	II	$10^{-7}-10^{-6}$	3.15s-3.15min
	III	$10^{-6}-10^{-4}$	3.15-52.6min
	IV	$10^{-4}-10^{-2}$	52.6min-3.65días
	V	$10^{-2}-10^{-1}$	3.65-36.5días
	VI	$10^{-1}-10^0$	36.5d-1 año
	VII	10^0-10^1	1-10años
	VIII	10^1-10^2	10-100años
Histórica	IX	10^2-10^3	100-1000años
	X	$10^3-2 \times 10^3$	1000-2000años
Hiperhistórica	XI	$2 \times 10^3-5 \times 10^3$	2000-5000años
	XII	$>5 \times 10^3$	>5000años

Tabla 2.5: escala de diacronía de los movimientos (Modificada de Chacón, 2008).

Así la escala contemporánea incluye todos los movimientos que se producen en la actualidad o que han tenido actividad en los últimos 100 años. La escala histórica engloba los movimientos ocurridos hasta hace 2000 años, documentados con técnicas histográficas convencionales, informes y documentos e incluso con evidencias directas y la hiperhistórica incluye el periodo anterior, con movimientos de edad superior a los 2000 años que pueden establecerse mediante evidencias geológicas y geomorfológicas, arqueológicas, dataciones radiométricas, estudios de líquenes o dendrocronología (Chacón, 2008).

Intensidad

La información sobre la intensidad está ligada con la definición de riesgo de un determinado movimiento, por lo que la intensidad se considera una medida de la capacidad destructiva. La intensidad se define como una función dependiente del volumen movilizado (v) y de la velocidad del movimiento (s), Cardinalli, et al (2002):

$$I=f(v,s)$$

En la Tabla 2.6 se recoge una clasificación de movimientos según su intensidad considerando el volumen y la velocidad de los posibles movimientos, estableciéndose 15 niveles de intensidad: débil (1), moderada (2-4), alta (5-9) y muy alta (10-15), Chacón (2008):

Volumen (m ³)	Velocidad	Rápido: Caída de rocas	Rápido: flujo de derrubios	Lento: deslizamiento
<0.001		Débil 1		
0.001-0.5		Moderada 2		
0.5-500		Alta 5	Débil 1	Débil 1
500-10000		Alta 6	Moderada 4	Moderada 3
10000-500000		Muy alta 10	Alta 8	Alta 7
>500000		Muy alta 12	Muy alta 11	Alta 9
>>500000		Muy alta 15	Muy alta 14	Muy alta 13

Tabla 2.6: clasificación de intensidades de movimientos de ladera. Modificada de Chacón, 2008

La principal dificultad al considerar la intensidad es establecer una clasificación para todo tipo de movimientos, rápidos y lentos, ya que en el caso de los deslizamientos profundos la intensidad puede ser variable en cada etapa de actividad del movimiento. Por otro lado las consecuencias de los movimientos lentos son muy diferentes a las de los rápidos puesto que en casos de intensidad muy alta en movimientos rápidos sus consecuencias suelen ser catastróficas pero en el caso de los movimientos lentos éstas puede ser paliadas o mitigadas al tener más tiempo para establecer medidas.

Capacidad Destructiva

Para poder evaluar la capacidad destructiva de los movimientos, es necesario tener en cuenta otro tipo de variables del mismo, como son la intensidad y la diacronía. Así pues podemos realizar una clasificación de los movimientos teniendo en cuenta las combinaciones de intensidad y diacronía observadas en casos reales para establecer una clasificación de la capacidad destructiva de los movimientos (Tablas 2.7 y 2.8):

Intensidad ----- Diacronía	Débil (1)	Mod (2)	Mod (3)	Mod (4)	Alta (5)	Alta (6)	Alta (7)	Alta (8)	Alta (9)	Muy Alta (10)	Muy Alta (11)	Muy Alta (12)	Muy Alta (13)	Muy Alta (14)	Muy Alta (15)
I		1		2	3	5		5		6	6	7		7	8
II				2		5		5		6	6	7		7	8
III				2				5		6	6	7		7	8
IV			1				3		4				4		
V			1				3		4				4		
VI			1				3		4				4		
VII			1				3		4				4		
VIII			1				3		4				4		
IX							3		4				4		
X							3		4				4		
XI															
XII															

Tabla 2.7: Capacidad destructiva Cd establecida con el criterio de la combinación de la intensidad con la diacronía del movimiento en 8 niveles (Modificada de Chacón, 2008).

Capacidad destructiva (Cd)	Descripción
1	Daños moderados, reparables o nulos; posibles víctimas, incluso mortales, en casos muy excepcionales
2	Daños serios en viviendas infraestructuras, reparables y alguna posible víctima mortal ocasional
3	Daños en poblaciones o infraestructuras con reparación costosa y posibles víctimas mortales ocasionales
4	Daños en poblaciones o infraestructuras con reparación muy costosa o inviable. Posibles víctimas mortales ocasionales
5	Daños en poblaciones o infraestructuras con reparación muy costosa o inviable. Víctimas mortales numerosas
6	Daños en poblaciones o infraestructuras con reparación inviable. Víctimas mortales numerosas
7	Daños en poblaciones o infraestructuras con reparación inviable. Destrucción masiva de poblaciones afectadas.
8	Daños completa de poblaciones e infraestructuras con reconstrucción inviable. Cifra de víctimas mortales muy elevada.
	Combinación de criterios intensidad- diacronía sin interés.

Tabla 2.8: Equivalencia del grado de capacidad destructiva con los daños producidos sobre el terreno (Modificada de Chacón, 2008).

En Cruden y Varnes, 2006 se realiza una evaluación de la capacidad destructiva teniendo en cuenta la velocidad de los movimientos (Tabla 2.9):

Clase de velocidad del movimiento	Importancia destructiva probable
7	Catástrofe. Edificios destruidos por impacto del material movilizado. Gran cantidad de muertes. Escapatoria improbable.
6	Algunas muertes, velocidad demasiado alta para permitir a todas las personas escapar.
5	Posible evacuación de escape. Estructuras, posesiones y equipamientos destruidos.
4	Algunas estructuras temporales se pueden mantener en pie temporalmente.
3	Se tienen que llevar a cabo construcciones de reparación durante el movimiento;
2	Algunas estructuras permanentes no resultan dañadas. Estructuras se pueden mantener en pie con frecuentes labores de mantenimiento si el movimiento total no supera una cierta aceleración.
1	Imperceptible sin instrumentos; es posible la construcción con precauciones.

Tabla 2.9: Definición de la importancia destructiva probable de los movimientos de distintas clases de velocidad. (Modificado de Cruden y Varnes, 1996)

Monitorización de deslizamientos

Generalmente en los movimientos de ladera el desplazamiento de la masa se produce en dirección oblicua respecto a la horizontal, por lo que el movimiento se define por componentes horizontal y vertical, y por lo tanto la monitorización requiere conocer y medir ambas componentes.

La monitorización de los movimientos de ladera se realiza tradicionalmente mediante redes de instrumentos instalados “in situ” como extensómetros e inclinómetros o bien mediante redes de observación geodésica, nivelación de alta precisión o GPS. Actualmente se pueden realizar estudios que combinan distintas técnicas de observación directa de tipo geotécnico y /o geodésico y técnicas de teledetección, entre ellas la técnica DInSAR.

Dentro de las técnicas de observación directa, los instrumentos se pueden situar en la superficie de la masa en movimiento o en sondeos para realizar medidas en profundidad. Con estas técnicas podemos llegar a conocer la dirección y velocidad del movimiento, su localización, forma y dimensiones y también la profundidad de la superficie de rotura en distintos puntos y el espesor de la masa desplazada. Una descripción de las técnicas empleadas se encuentra en Mikkelsen (1996), Bell (2003), Price and Higginbottom. (2009).

Medidas en la superficie de la masa movilizada

El control de la superficie en movimiento se puede realizar mediante técnicas convencionales de observación, el uso de distanciómetros electrónicos o equipamientos láser, que proporcionan resultados precisos. Las observaciones se deben de diseñar de forma que se adapten a la topografía y a las direcciones previsibles del movimiento. En el diseño y establecimiento de las redes de control, sobre las que se realizan las medidas, hay que tener en cuenta que tienen que abarcar no sólo la zona del movimiento sino las zonas estables circundantes, con objeto de poder obtener resultados de movimiento relativos a zonas estables. En muchos casos esto puede constituir un problema, ya que no se conocen con exactitud los límites del movimiento (Mikkelsen, 1996).

Además, el diseño de la red observación tiene que contemplar las distintas zonas que se pueden distinguir en un movimiento de ladera, considerando puntos de medida en la coronación, zona media de la masa y en el pie (Figura 2.4). En este sentido es posible realizar un control del movimiento de las laderas de forma automatizada, usando instrumentos de observación como la estación total, programando medidas a lo ancho de la ladera en distintas secciones transversales.

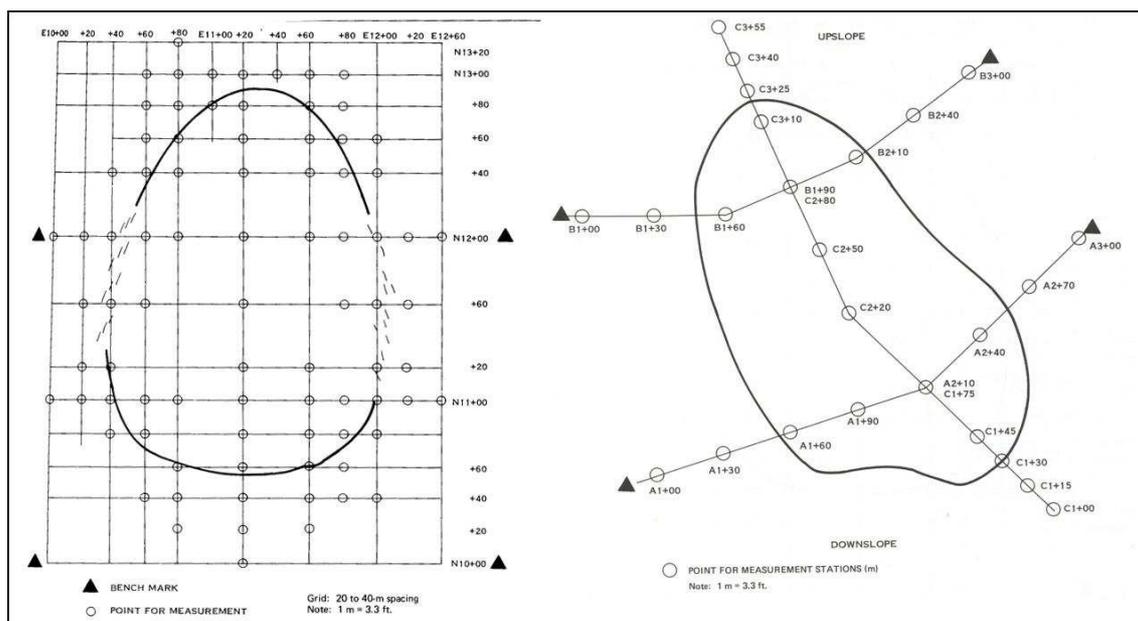


Figura 2.4: diseños de redes de observación en superficie para movimientos de ladera (Sowers y Royster, 1978)

La fase incipiente del movimiento se caracteriza por la aparición de grietas de tracción en la cabecera o de otros tipos de deformación como abombamientos o hundimientos. En este caso la medida de apertura y extensión de las grietas, su profundidad o desnivel vertical, ofrece una primera estimación del desplazamiento. Para realizar estas medidas emplean extensómetros de superficie, consistentes en varillas con mangas que se extienden entre puntos de anclaje a ambos lados de la grieta y un sensor mecánico o eléctrico (Dunnicliff, 1988).

En el caso de deslizamientos rotaciones se usan medidores de inclinación de superficie portátiles, aplicados sobre un punto del deslizamiento. Con este tipo de instrumentos se puede establecer una red de medidas en una serie de puntos de referencia de la superficie, trasladándolos de unos puntos a otros de la red, o estableciendo una red permanente y conectándolos a un aparato que almacene los datos medidos (Bell, 2003).

Medidas en sondeos subsuperficiales

También se pueden realizar medidas en la masa deslizada con extensómetros, inclinómetros y deflectómetros en sondeos. La precisión con la que se puede establecer la situación del plano de rotura con los extensómetros es mucho menor que con el uso de inclinómetros.

Los extensómetros en sondeo se emplean para medir desplazamientos verticales del suelo a diferentes profundidades. Los extensómetros de sondeo fijos pueden ser de varillas múltiples o única. El extensómetro de sondeo de varilla única se ancla en la perforación y controla el movimiento que se produce entre la varilla y su funda de referencia. Su uso está limitado a casos en los que se espere una deformación en una dirección aproximadamente paralela a la de la perforación en la que se encuentra el extensómetro y esto hace que se poco utilizado. Las instalaciones de múltiples varillas controlan el movimiento a varias profundidades mediante varillas de diferentes longitudes. Cada varilla está aislada en una funda y el conjunto completo se introduce en el suelo fijándose con una lechada y una serie de anclajes, permitiendo que cada varilla se mueva libremente dentro de su funda.

Otro tipo de extensómetro de sondeo es el multi punto, que usa alambres tensionados en vez de varillas para controlar la deformación perpendicular a los ejes del sondeo. En un sondeo se pueden instalar más de 10 anclajes y alambres. En la cabeza del extensómetro

cada alambre pasa sobre una polea y se sujeta a un peso.

Los inclinómetros se utilizan para medir movimientos horizontales por debajo de la superficie (Mikkelsen, 1996). Los inclinómetros diseñados para instalarse en sondeos de forma permanente están formados por una cadena de varillas pivotadas. En los puntos de pivote se pueden medir los movimientos angulares entre varillas (Bell, 2003). Otro tipo de inclinómetros permanentes usa una tira de metal flexible sobre la cual se mide la tensión de resistencia, que graba cualquier curvatura en la tira inducida por movimientos del terreno. Los inclinómetros más usados en los trabajos de estabilidad de laderas son los de posición fija, que controlan los movimientos laterales entre cuello del sondeo y una referencia profunda.

Dentro del instrumental instalado en sondeos también se encuentran los piezómetros, que se utilizan para medir la presión de poros de los materiales afectados por el movimiento de ladera. Este tipo de medidas se relacionan con las causas del movimiento y ayudan a controlar y establecer umbrales de cantidad de lluvia o presión de poros necesarios para desencadenar el movimiento.

2.1.3.-SUBSIDENCIAS

No existe una unanimidad en los que refiere al concepto de subsidencia, encontrándose en la literatura diferentes definiciones. Desde definiciones como la de Bell (2003), que limita el concepto de subsidencia a los fenómenos de hundimiento del terreno vinculados la extracción de material sólido, fluido o gas del subsuelo, a otras como la de Waltham (2005) que lo amplían a un movimiento descendente del terreno, encontramos definiciones como la del USGS (informe 1182, Galloway et al, 1999): Asentamiento gradual o hundimiento repentino de la superficie de la tierra debido a un movimiento subsuperficial, o la recogida en el “Dictionary of Mining, Mineral, and Related Terms” editado por Oficina de minas de Estados Unidos (1996): Hundimiento inesperado o asentamiento gradual descendente de la superficie de la tierra sin movimiento horizontal o con movimiento horizontal pequeño. Este movimiento no está restringido en tasa, magnitud ni área implicada. Puede estar causada por procesos geológicos naturales, como disolución, deshielo, compactación, deformación lenta de la corteza o retirada de lava fluida por debajo de corteza sólida, o por actividades humanas, como minería subsuperficial o la extracción de petróleo o agua subterránea.

En lo sucesivo se considerará el término subsidencia conforme a esta última, ya que incorpora un aspecto fundamental frente a otras, y es que la componente principal, o en algunos casos la única, de este tipo de desplazamientos es la componente vertical. (Figura 2.5).

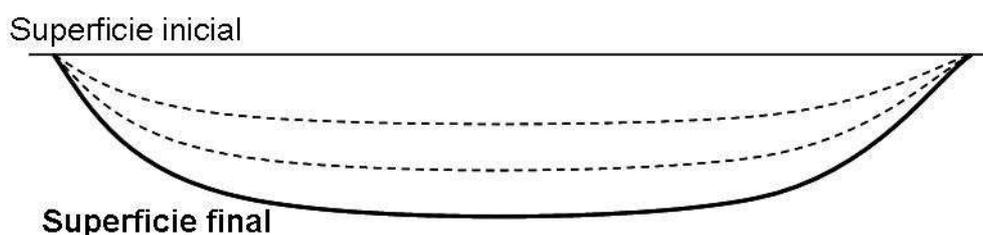


Figura 2.5: Esquema del fenómeno de subsidencia.

Clasificación

Una clasificación de los ambientes a los que se asocia y a la profundidad a la que pueden aparecer este tipo de fenómenos se resume en tres categorías:

A) Procesos Superficiales. Dentro de ellos se incluyen:

1. Rocas y suelos porosos y deformables sometidos a procesos de consolidación bajo carga o cambios de la presión de poros. El principal material implicado son las arcillas, pero los procesos pueden aparecer en turba y limos, así como en la mayoría de los tipos de relleno artificial, en el permafrost, al derretirse el hielo del suelo, y en algunas arenas cuando se producen vibraciones por terremotos. Las subsidencias pueden ser locales, debidas a cargas estructurales o regionales debidas a cambios en las condiciones generales del agua subterránea o del nivel de base.

La subsidencia en arcillas está asociada a propiedades especiales de sus minerales, concretamente a la retención o expulsión de agua y su baja resistencia, que les hace tener propiedades de deformación plástica. Su plasticidad se deriva del agua que está adherida a las partículas del mineral de arcilla. Estas se pueden compactar causando subsidencia cuando el agua se expulsa debido a cargas sobre estos materiales o en respuesta a una extracción de la misma (Waltham, 2005). La subsidencia asociada a la extracción de agua subterránea puede aparecer en zonas donde esta se produce de forma extensiva, originando que la tasa de extracción del agua subterránea sea mayor a la tasa de recarga natural. Esto produce una disminución en la cantidad de agua contenida en las rocas y suelo de la zona, que se traduce en una compactación de los depósitos de sedimentos como resultado de la disminución de la presión efectiva. (Bell, 2003). La subsidencia no suele ocurrir de forma simultánea a la extracción de agua, sino durante un periodo de tiempo más largo. La magnitud de la subsidencia está controlada por el incremento de la presión efectiva, el espesor y la compresibilidad de los depósitos implicados, la profundidad a la que ocurre, la duración en la que el incremento de carga se aplica y posiblemente el tipo y tasa de presión aplicada. La velocidad a la que se produce la consolidación depende del espesor de los estratos afectados, así como de la velocidad a la que el agua contenida en los poros se drena fuera del sistema, que a su vez está controlada por su permeabilidad.

La subsidencia por consolidación debido a cargas, se da cuando se superan los límites de carga establecidos. Su valor depende de la mineralogía y la historia de consolidación. Los límites precisos de carga se calculan teniendo en cuenta el

contenido de agua y los parámetros de fricción interna y cohesión. Cuando se exceden estos límites se pueden producir asentamientos, con efectos más importantes si son diferenciales (Waltham, 2005). Las mayores subsidencias en arcillas se producen cuando se combinan la extracción de agua con la compactación por cargas. El principal ejemplo de ello es la Ciudad de México (Figueroa Vega, 1984).

2. Rocas con grandes cavidades, que se ocupan por el material de la superficie del terreno, por derrumbe o deformación. Estas cavidades pueden tener origen natural por erosión interna, en las de origen kárstico, o antrópico por actividades como la minería. Las cavidades, grutas o cuevas naturales aparecen principalmente en rocas calizas o en yesos, aunque también pueden darse en coladas de lava de basalto o en sales. La subsidencia en áreas kársticas ocurre cuando se produce una erosión interna de la roca, que da lugar a la aparición de cavidades subterráneas. Al haberse generado un vacío en el interior de la roca, estas cavidades tienen a rellenarse con los materiales que hay en la parte superior y formar dolinas o sumideros, generándose en la superficie topográfica un desnivel. En el caso de que los materiales sean rocas o suelos cohesivos, se produciría un colapso, de forma que aparece un vacío en la superficie de dimensiones variables. En el caso de que existan suelos no cohesivos en la superficie, se puede producir una compactación de los mismos, por que lo que en la superficie se generaría una depresión, o bien producirse un lavado del suelo a través de grietas y fisuras, dando lugar a zonas subsidentes en la superficie del terreno. Algunos autores como Waltham et al (2005), Jenninngs (1985), Culshaw and Waltham (1987), consideran como subsidencia sólo los casos en los que se produce un lavado de suelos no cohesivos y el caso de colapso cuando este afecta únicamente a suelos cohesivos situados sobre las rocas calizas.

B) Procesos profundos, que se corresponden con:

3. Subsidencia tectónica, de bloques corticales sujetos cuyos desplazamientos están controlados por las tensiones de la tectónica de placas o son el resultado de procesos de ajuste gravitatorio intraplaca. El primer caso ocurre en los márgenes de placas convergentes, concretamente en las zonas de subducción. El segundo se da en zonas donde el estiramiento de una placa causa que la corteza se afine y

desienda. La deformación cortical puede causar subsidencia regional (hundimiento tectónico), y, en otras zonas, el movimiento de ascenso de magma y la emisión de lava puede causar el deshinchamiento o depresión de áreas más pequeñas.

Medida y control en áreas subsidentes

La medida de los fenómenos de subsidencia se ha realizado tradicionalmente con métodos directos, estableciendo redes de control y medida “in situ” con diferentes instrumentos. Dentro de otras técnicas, de tipo indirecto, usadas para controlar la subsidencia podemos citar la fotogrametría (Gubellini et al. 1986).

De los métodos directos los más usados son:

- La nivelación de precisión, referenciada a algún punto estable, externo al área afectada (Kontogianni et al, (2006)),
- Extensómetros de sondeo, utilizados para controlar la cantidad de consolidación sufrida por los depósitos y su cambio de espesor, en un intervalo de profundidad que está por encima de un conjunto de cotas de referencia,
- Inclínómetros, para observar cambios de cota de los movimientos horizontales del terreno, en los bordes de la zona subsidente.

La combinación de medidas de extensómetros, en intervalos temporales largos, con piezómetros, hace posible la determinación de propiedades del sistema acuífero que controla la subsidencia.

La combinación de estas técnicas con la Interferometría Diferencial de RADAR, DInSAR, se viene incorporando a los estudios de las zonas subsidentes en los últimos años, como se recoge en el apartado 2.3.2.

2.2.- TÉCNICAS RADAR APLICADAS AL CONTROL DE DEFORMACIONES DEL TERRENO.

2.2.1.- FUNDAMENTOS DE SAR Y DINSAR.

Nociones sobre las imágenes RADAR

La interferometría trabaja con imágenes de RADAR de apertura sintética generadas por un sensor activo que emite y recibe su propia radiación en la banda del espectro electromagnético correspondiente a las microondas entre las longitudes de onda de 0.3 y 100 cm. (Figura 2.6).

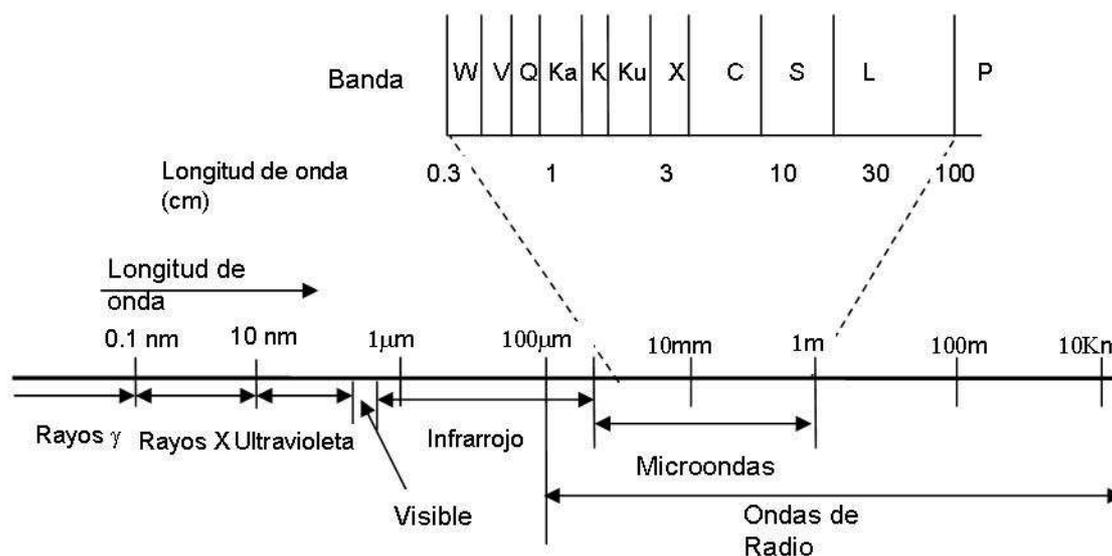


Figura 2.6: longitudes de ondas usadas en Teledetección: Ampliación de las microondas. (Elaboración propia)

Esto hace que se generen imágenes a cualquier hora del día y de la noche, ya que para ello no dependen de la radiación solar. Otra de las ventajas que presentan estas imágenes es la independencia de su toma respecto a las condiciones meteorológicas, puesto que las microondas atraviesan las nubes, aunque pueden aparecer en las imágenes efectos atmosféricos a tener en cuenta.

Características de las imágenes SAR: Distorsiones

La geometría de las imágenes RADAR difiere de las imágenes de teledetección óptica, ya que los sensores radar tienen visión lateral, por lo que las imágenes RADAR tienen

forma rectangular y una resolución decreciente entre las zonas más próximas al sensor (*near range*) y las zonas más alejadas (*far range*). (Figura 2.7)

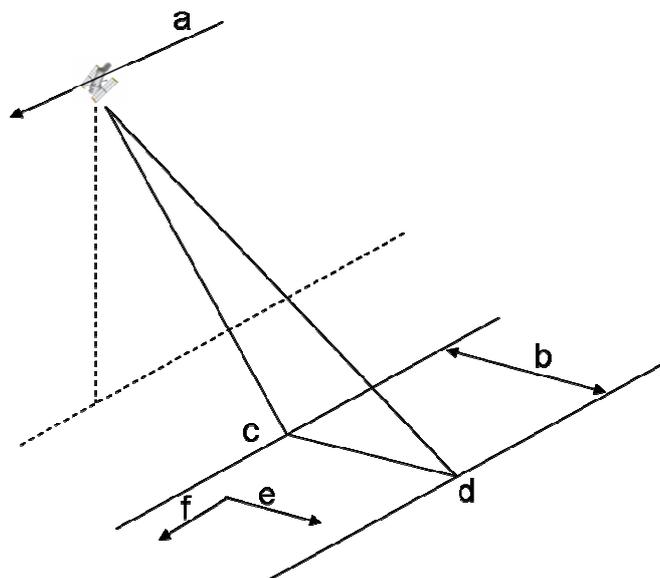


Figura 2.7: Geometría de toma de imágenes radar: A trayectoria del sensor; B distancia perpendicular sensor- superficie terrestre; C: zona de captura del sensor o Huella; D: rango en la dirección perpendicular al sensor (*across-track*); E: rango en la dirección del sensor (*along-track*). (Elaboración propia)

En consecuencia, las imágenes RADAR presentan una serie de deformaciones que condicionan tanto su interpretación, como las zonas que pueden ser estudiadas. Una de estas consecuencias es la sensación de que el relieve está “tumbado” en las imágenes (Figura 2.9). Los fenómenos de deformación de la superficie que aparecen en las imágenes son el acortamiento o *foreshortening*, la sombra o *shadow* y la inversión del relieve o *layover*. Cada una de ellas puede verse gráficamente en la Figura 2.8.

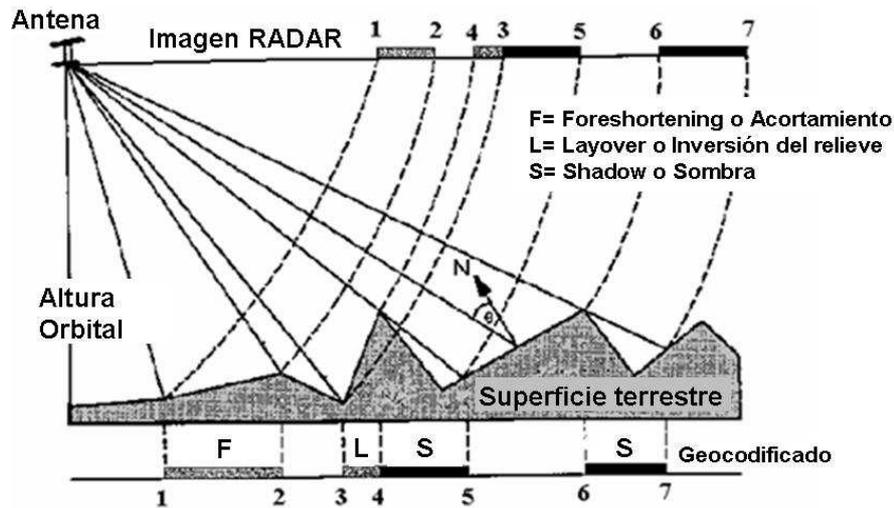


Figura 2.8: Distorsiones geométricas de las imágenes SAR. Modificado de Crosetto et al, 2005.

Es importante tener en cuenta que la visión del sensor es lateral, ya que todas las medidas que se obtienen mediante su uso se refieren a la línea de visión del sensor, *line of sight*, (LOS). Para el caso de los satélites ERS 1-ERS 2 la LOS se inclina 23° aproximadamente respecto de la vertical.



Figura 2.9: Ejemplo de imagen SAR de amplitud ERS1 del sur de la Provincia de Granada Comprimida 10 veces en azimut y 2 veces en range (Elaboración propia)

Características de las imágenes SAR: amplitud y fase

Las imágenes RADAR de apertura sintética (SAR) son además imágenes complejas por lo que constan de dos componentes (real e imaginaria) Ferretti et al. (2007):

$$I = A \cdot \cos\Phi \quad \text{Componente real}$$

$$Q = A \cdot \sin\Phi \quad \text{Componente imaginaria}$$

Siendo A la amplitud y Φ la fase.

A partir de estas componentes podemos obtener las imágenes de la amplitud y la fase:

$$\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right) \quad \text{Imagen de fase}$$

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad \text{Imagen de amplitud}$$

La imagen de Amplitud SAR corresponde a la interacción de la tierra con el sensor (es una función de la interacción de la onda con el terreno sobre la superficie). Un ejemplo de imagen de amplitud se muestra en la figura 4.

Las imágenes de amplitud contienen bastante ruido, entendido como perturbación de la señal. El ruido, y en consecuencia las imágenes SAR, están condicionadas por el fenómeno del moteado (*speckle*), típico de los sistemas de adquisición coherentes y que da un efecto granulado a la imagen (Rosen et al, 2000; Ferretti et al, 2007).

Este efecto, unido a las deformaciones geométricas ya comentadas, hace que las imágenes de amplitud SAR sean difíciles de interpretar.

Desde el punto de vista de la interferometría, las imágenes de amplitud sirven para situar en el espacio el sector en el que se realizarán los estudios interferométricos, ya que permiten reconocer elementos de la superficie terrestre registrada en la imagen SAR.

La imagen de fase es la parte fundamental para la interferometría, ya que proporciona la información fundamental para el estudio de la superficie terrestre (Crosetto et al, 2005).

Interferometría SAR (InSAR) y la Interferometría Diferencial (DInSAR)

La interferometría se centra en el estudio y explotación de la información proporcionada por las imágenes de fase de las imágenes complejas SAR (Hansen, 2001). Así pues usando imágenes adquiridas desde puntos de vista ligeramente distintos, se puede obtener información de la topografía de la superficie (caso de la generación de Modelos Digitales de Elevaciones DEM con interferometría) y también estudiar los desplazamientos que se han producido (caso de la Interferometría Diferencial SAR, DInSAR).

Tanto las técnicas InSAR como las DInSAR se basan en la explotación de la información contenida en uno o más interferogramas (Klees and Massonnet, 1999). Un interferograma es una imagen compleja que resulta de multiplicar una imagen SAR por la compleja conjugada de otra (Massonnet and Feigl, 1998; Rosen et al, 2000; Ferretti et al 2007). La información contenida en la fase del interferograma hace referencia a la diferencia de fase existente entre las dos imágenes SAR empleadas y se encuentra comprendida entre $-\pi$ y $+\pi$. Es lo que se denomina la fase enrollada (Figura 2.10). La diferencia de fase se codifica con una rueda de color cuyo el recorrido completo corresponde a una rotación completa de 2π o 360° en la diferencia de la fase (Klees and Massonnet, 1999)

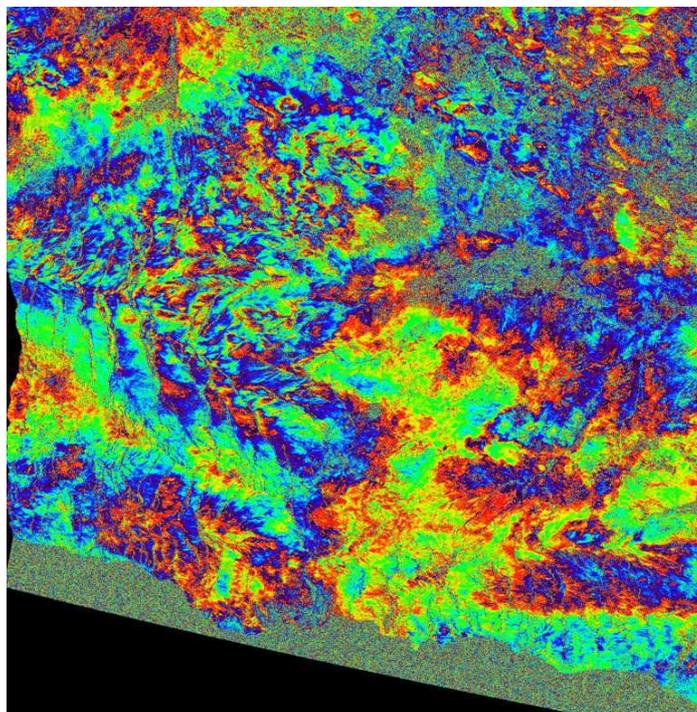


Figura 2.10: interferograma diferencial del sur de la provincia de Granada generado con dos imágenes ERS1 con diferencia temporal de 70 días. (Elaboración propia)

De las dos imágenes SAR empleadas para calcular un interferograma, a una de ellas se le denomina Maestra (*Master*) y a la otra Esclava (*Slave*). A excepción de la misión tándem ERS-1/2, en que los satélites ocupen la misma posición espacial con una diferencial temporal de 1 día, las imágenes Maestra y Esclava corresponden a posiciones ligeramente diferentes de un mismo sensor en diferentes órbitas y tiempo. El vector que conecta las posiciones de ambas órbitas se denomina Línea de Base o *baseline* (Rosen et al, 2000) y su proyección en la dirección perpendicular a la dirección de visión LOS se denomina Base Perpendicular (Rosen et al, 2000).

La fase interferométrica posee básicamente dos tipos de información: una relacionada con la topografía del terreno, que es la explotada por las técnicas InSAR y otra relativa a los desplazamientos del terreno, que es la explotada por las técnicas DInSAR (Rosen et al, 2000).

La interferometría diferencial es una técnica que pretende realizar un estudio de los desplazamientos del terreno a partir de los interferogramas. En los interferogramas se recogen las diferencias de fases entre las dos imágenes que los forman y estas diferencias pueden deberse a las formas del terreno y su desplazamiento (Klees and Massonnet, 1999).

Por tanto, para poder estudiar el desplazamiento del terreno se requiere eliminar la información topográfica. Para ello se introduce en el proceso la información sobre la topografía en forma de DEM (Klees and Massonnet, 1999). En este método se simula un interferograma sintético a partir del DEM con los parámetros orbitales de las dos imágenes que forman el interferograma. Al interferograma real se le sustrae el interferograma simulado, obteniéndose la diferencia de fase que se relaciona con el desplazamiento del terreno, que se denomina Interferograma Diferencial (Gabriel et al, 1989). La principal limitación de este método procede de la imprecisión del DEM utilizado. En este sentido se observa que cuanto menor sea la línea base de las imágenes empleadas en la generación del interferograma, menor será la sensibilidad del interferograma diferencial a las imprecisiones del DEM usado (Klees and Massonnet, 1999). La figura 2.11 ilustra el proceso de adquisición de imágenes, considerando la simplificación a un único píxel P (Crosseto et al, 2005).

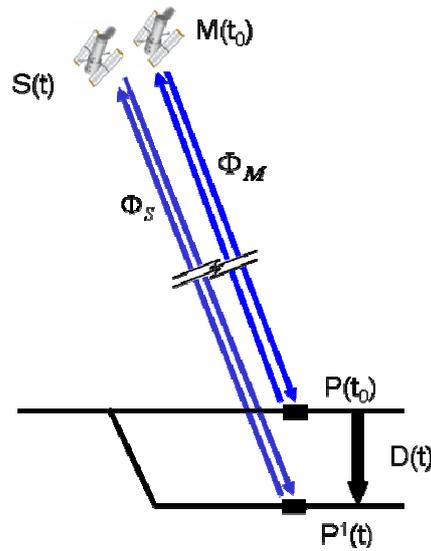


Figura 2.11: Diagrama de adquisición en caso de subsidencia entre las dos pasadas de un satélite. (Crosetto et al, 2005).

Para el caso de detección de deformaciones donde un punto P se ha desplazado a un punto P¹ durante el tiempo entre una adquisición y la otra, la fase interferométrica se ve afectada por diversos parámetros (Crosetto et al, 2005):

$$\Delta\Phi_{Int} = \Phi_S - \Phi_M = \frac{SP - MP}{\lambda} + \frac{SP^1 - SP}{\lambda} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Noise} = \Phi_{Topo} + \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Noise}$$

Donde:

Φ_S y Φ_M son las fases interferométricas de esclava (*slave*) y maestra (*master*).

Φ_{Atm} es la contribución de la atmósfera,

Φ_{Noise} es la componente debida al ruido,

Φ_{Topo} componente debida a la topografía del terreno,

Φ_{Mov} componente debida al desplazamiento,

SP es la distancia del satélite *esclavo* al punto, y

λ es la longitud de onda radar.

Si se conoce la topografía, mediante un DEM, la aportación de Φ_{Topo} se puede extraer (Φ_{Topo_Sim}) de $\Delta\Phi_{Int}$, obteniendo la fase diferencial $\Delta\Phi_{D-Int}$,

$$\Delta\Phi_{D-Int} = \Delta\Phi_{Int} - \Phi_{Topo_Sim} = \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Res_Topo} + \Phi_{Noise}$$

donde Φ_{Res_Topo} representa la componente residual debida a los errores del DEM.

Interferometría Diferencial Avanzada (A-DInSAR) y las técnicas Multi-interferograma.

En el caso de la realización de un estudio que abarque un periodo de tiempo amplio, que no es posible cubrir con un único o con unos pocos interferogramas mediante su análisis visual, se hace necesario considerar una serie de interferogramas diferenciales que se traten de forma conjunta por un software, para obtener así un valor de movimiento medio en el periodo considerado. Las técnicas que usan un conjunto o Pila (*Stack*) de interferogramas diferenciales tratados conjuntamente se le denominan Técnicas Multi-interferograma o Interferometría Diferencial Avanzada (A-DInSAR). Normalmente estas técnicas realizan además correcciones atmosféricas (Crosetto et al, 2005).

Con ellas se consigue corregir las deficiencias de las técnicas DInSAR clásicas, obteniendo:

- Estimación de la evolución temporal del desplazamiento.
- Precisión del orden del milímetro.
- Minimización del error topográfico y efectos atmosféricos.
- Monitorización de desplazamientos lentos.

A continuación se recogen de forma breve la técnicas multi interferograma más conocidas y usadas. Las publicaciones mencionadas en cada una de ellas exponen con mayor detalle dichas metodologías.

Técnica Small Baseline DInSAR (SBAS).

Esta técnica (Berardino et al, 2002) está basada en una adecuada combinación de interferogramas diferenciales producidos con imágenes con líneas base (*baseline*) pequeñas. El esquema del algoritmo puesto a punto en esta técnica se muestra en la Figura 2.12.

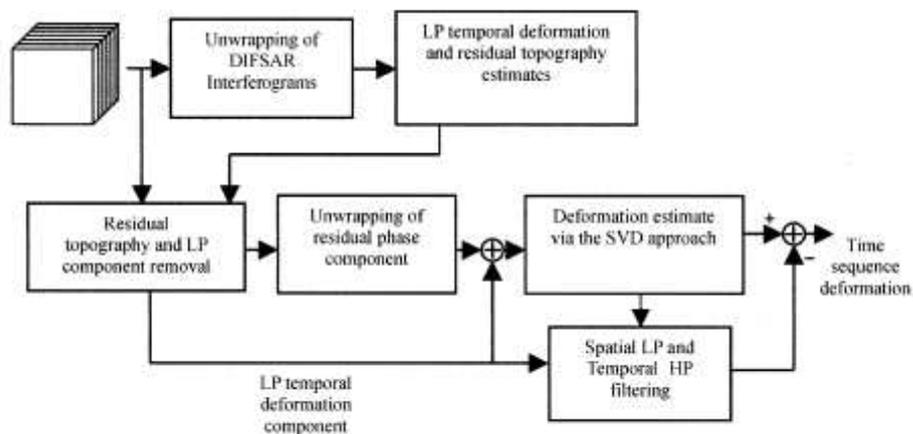


Figura 2.12: esquema del algoritmo SBAS (Berardino et al, 2002)

El algoritmo parte de una serie de interferogramas diferenciales de línea de base pequeña y desenrollados, que pueden haber sido calculados con cualquiera de las herramientas existentes. El algoritmo incluye la estimación del error topográfico y operaciones de filtrado de la fase atmosférica.

Después del desenrollado de la fase, se estiman conjuntamente un componente temporal LP (de paso bajo, *low pass*) de la deformación y los posibles efectos de la topografía. Esta estimación se realiza mediante mínimos cuadrados.

Seguidamente se sustraen a cada interferograma de entrada los parámetros calculados (LP y Efectos topográficos) y se vuelve a calcular un nuevo desenrollado de la fase.

Una vez calculada la fase desenrollada residual se le añade la componente temporal LP, para proceder a la estimación de la deformación.

Esta estimación está afectada por posibles efectos atmosféricos. Para eliminarlos se realiza un filtrado doble: espacial de paso bajo y temporal de paso alto, ya que los efectos atmosféricos tiene una alta correlación espacial y una baja correlación temporal.

Una vez que se ha evaluado la componente atmosférica de la fase, finalmente se sustrae de la señal de fase estimada y se realiza la conversión de la señal en desplazamiento.

Técnica Interferometric Point Target Analysis (IPTA).

Publicado por Werner et al, 2003, está implementado en el software comercial Gamma.

Utiliza almacenaje y gestión de la información de los interferogramas de tipo vectorial para el ahorro de espacio de almacenaje y eficiencia y finalmente realiza una conversión a datos ráster.

La secuencia de procesado se sintetiza en la Figura 2.13.

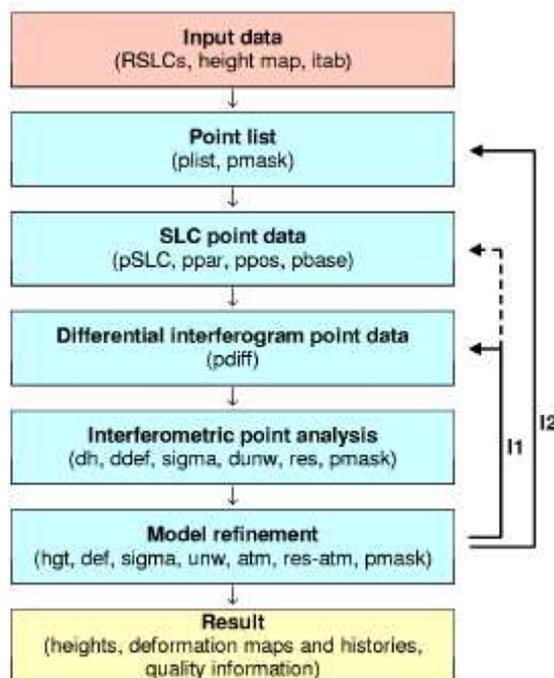


Figure 1: Interferometric point target analysis (IPTA) processing approach.

Figura 2.13: secuencia del procesado IPTA (Werner et al, 2003)

El proceso empieza, en primer lugar, con la configuración de una pila de imágenes focalizadas (SLC), corregistradas. A esto se une un listado con las parejas de imágenes SLC a considerar para los interferogramas, así como el DEM a utilizar.

En el segundo paso se elabora una lista con los puntos candidatos a ser considerados para el análisis, que se realiza basándose en la baja variabilidad temporal de su retrodispersión¹. En una etapa posterior del procesado se usa como criterio de selección la desviación estándar de la fase con respecto al modelo.

En tercer lugar se extraen los valores SLC de los puntos candidatos en una pila de datos puntuales y se hace un calculo inicial de las líneas base interferométricas.

¹ retrodispersión: energía incidente dispersada por un objeto, depende de varios factores como la rugosidad y geometría del terreno, el ángulo de incidencia del flujo de energía y la polarización

En cuarto lugar se calculan los interferogramas diferenciales.

En el quinto paso se analiza la pila de interferogramas diferenciales calculados, primeramente en el dominio temporal. Se realiza un análisis de regresión bidimensional de la fase con la base perpendicular y de la fase con el intervalo temporal para cada uno de los puntos. El criterio de calidad utilizado para descartar o aceptar los puntos del análisis IPTA es la desviación estándar de la fase respecto de la regresión.

Los resultados de esta fase son: correcciones de altitud, tasa de deformación lineal, una medida de la calidad, fases residuales y la fase interferométrica desenrollada, que se usan como parámetros iniciales de una nueva iteración del proceso. Dentro de las fases residuales se incluye la fase atmosférica, además de la deformación no lineal y los términos de error.

Así el resultado del IPTA, incluye las alturas, las tasas de deformación lineal, la fase atmosférica, líneas base refinadas, información sobre la calidad y la deformación no lineal para cada uno de los puntos analizados.

Coherent Pixels Technique (CPT): Técnica de Píxeles Coherentes.

El algoritmo usado en esta técnica (Mora, 2004; Mora et al, 2003) estima las componentes lineal y no lineal del desplazamiento, el error del DEM usado y los efectos atmosféricos para un número reducido de interferogramas que se tratan de forma conjunta y que no necesitan poseer una imagen maestra común. Los píxeles candidatos se seleccionan conforme a un modelo mediante el criterio de la coherencia, de ahí el nombre de la técnica, ya que sólo los píxeles que presenten en todas los interferogramas una coherencia por encima de un umbral son considerados para el análisis.

En resumen los principales pasos del algoritmo son:

- a) Selección del conjunto de imágenes que cubren el intervalo temporal deseado,
- b) formación de pares de imágenes óptimos para el cálculo de los interferogramas según la línea base espacial máxima permitida,
- c) identificación de los píxeles candidatos (aquellos que presentan una buena calidad de la fase) con el criterio basado en la estabilidad de su coherencia a lo largo de la pila de interferogramas,

- d) triangulación de los píxeles seleccionados para establece relaciones de la fase entre ellos, y el ajuste del modelo lineal que considera la deformación lineal y el error del DEM a partir de estas relaciones para el conjunto completo de interferogramas.

Una vez estimada la deformación lineal se pasa a la estimación de la componente no lineal del desplazamiento, aislando esta componente de los efectos atmosféricos aplicando filtros sucesivos espacial y temporal. Finalmente los resultados son integrados e interpolados para generar los mapas de desplazamiento.

La técnica de los Permanent Scatterers (PS, Dispersores Permanentes)

Esta técnica patentada (Ferretti et al, 2000, Ferretti et al, 2001) es una de las más extendidas y se basa en la estimación de la velocidad en ciertos puntos de las imágenes que son los denominados Permanent Scatterers (“Dispersores Permanentes” (PS)). Estos puntos corresponden a objetos de la superficie que permanecen invariables en el periodo de análisis y en todas las imágenes consideradas. Para ello deben cumplir la condición de tener una amplitud estable en todas las imágenes. De todos los PS detectados como candidatos, serán considerados como verdaderos PS aquellos que tengan una coherencia por encima de umbral. Además para que el análisis pueda llevarse a cabo es necesario que haya una densidad de PS mínima, de más de 25 por Km².

A diferencia de la técnica anterior, es necesario una mayor cantidad de imágenes, al menos unas 30, y que todas ellas tengan la misma imagen maestra, lo que, en algunos casos, resulta difícil. Sin embargo el hecho de que el tamaño de los PS sea menor que el de la resolución de la celda, hace posible el uso de interferogramas con línea base grande.

Con ella se estima, para cada uno de los PS, las componentes lineal y no lineal del desplazamiento y las correcciones topográficas, considerando los efectos atmosféricos.

La técnica de Stable Point Network, SPN (Red de Puntos Estables)

Esta técnica expuesta en varias publicaciones (Arnaud et al, 2003, Duro et al, 2003; Duro et al, 2005, Crosetto et al, 2008) fue la primera herramienta de A-DInSAR capaz de combinar datos de los satélites ERS y ENVISAT (Duro et al, 2005). El software SPN

se basa en la cadena interferométrica del software comercial DIAPASON para todos los tratamientos de los datos SAR, trabajo de corrección y generación de interferogramas. Las principales fases y los productos resultantes se muestran en la Figura 2.14. Los elementos básicos se describen en Crosetto et al. (2008) y son: 1) La selección de píxeles, que puede basarse en la estabilidad de la amplitud SAR, la coherencia interferométrica o la coherencia espectral, según los casos a analizar y el número de imágenes SAR disponibles, 2) El uso de múltiples imágenes y 3) La capacidad de modelaje. La técnica estima a partir de la fase DInSAR: la deformación, el error topográfico residual y los efectos atmosféricos, separando estas tres componentes de la fase del ruido.

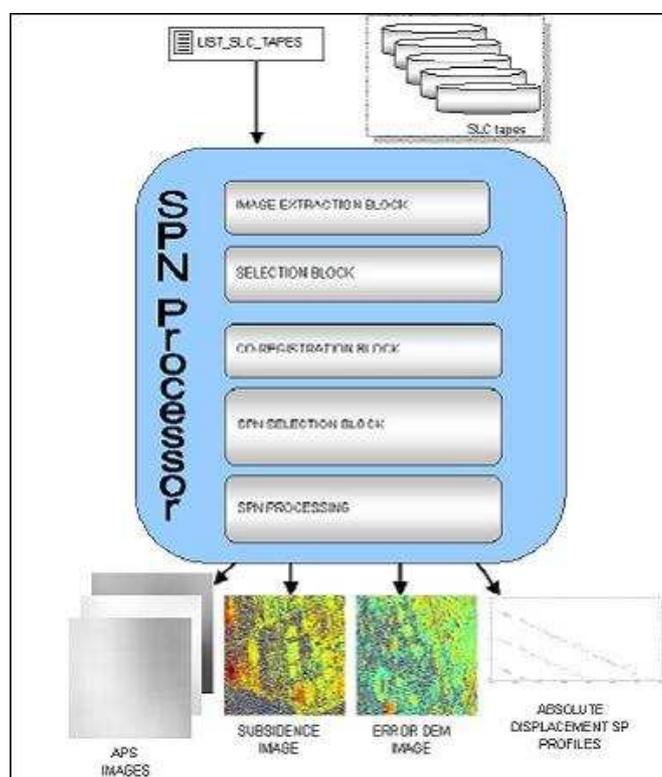


Figura 2.14: Principales fases y los productos resultantes de la técnica SPN (Duro et al, 2005).

Los productos principales que se obtienen tras el procesado son tres (figura 2.14): 1) El mapa de deformación media, representada por la velocidad lineal de deformación de todo el periodo de estudio en la dirección LOS del sensor y referida a un punto de la imagen tomado como referencia. La precisión que puede llegar a alcanzar la estimación de la deformación es de menos de 1 mm/año y por tanto similar a la de la técnica de Permanent Scatters; 2) mapa de los errores topográficos residuales, y 3) serie temporal de la deformación de cada punto estable, que describe la evolución temporal de la deformación en cada uno de ellos (Crosetto et al, 2008).

2.3.- ANTECEDENTES

2.3.1. ORÍGENES Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA TÉCNICA DInSAR

Las primeras aplicaciones de las imágenes RADAR parten de plataformas aéreas, con el radar lateral SLAR y se utilizaron como alternativa a las fotografías aéreas para el estudio de zonas tropicales, cubiertas muy frecuentemente por nubes, ya que las microondas pueden traspasarlas (Allan, 1983, Trevett, 1986). El principal problema de estos sensores era la baja resolución espacial debido al pequeño diámetro de la antena (Chuvieco, 1990).

Este inconveniente desapareció con el RADAR de Apertura Sintética, SAR, ya a bordo de satélites. Sus comienzos se remontan a 1978 con el satélite de aplicaciones oceanográficas SEASAT de la NASA, utilizado satisfactoriamente para estudios del geoide marino, oleaje, detección de bancos de arena sumergidos y corrientes oceánicas (Elachi, 1982). Su éxito hizo que se lanzaran dos misiones de características similares SIR-A y B, en 1981 y 1984, que confirmaron la posibilidad de utilizar estas imágenes para otras aplicaciones, como la cartografía temática de vegetación. El creciente interés por este tipo de imágenes y sus potenciales aplicaciones, hizo que se planificasen nuevos proyectos espaciales que incorporasen de forma sistemática este tipo de información (Chuvieco, 1990) Tabla 10 (ver detalles en Hanssen, 2001 y Tabla 4.5 del Capítulo 4 sobre los parámetros de los sensores SAR de cada satélite).

Satélite	Lanzamiento	Operativo hasta	Nacionalidad
ERS-1	1991	2000	Europea
JERS-1	1992	1998	Japonesa
ERS-2	1995	2005	Europea
RADARSAT-1	1995		Canadiense
ENVISAT	2002		Europea
ALOS	2006		Japonesa
TerraSAR-X	Junio 2007		Alemana
RADASAT-2	Dic. 2007		Canadiense

Tabla 10: Satélites con capacidad de realizar imágenes SAR.

El primer estudio publicado del uso de las imágenes SAR para la detección de deformaciones del terreno apareció con la publicación de Gabriel et al. (1989), en la

que se usa por primera vez la técnica DInSAR con imágenes SEASAT estudiando deformaciones atribuidas a la expansión de arcillas por absorción de agua en el Valle Imperial, California, EEUU.

En el caso de los satélites europeos, los primeros experimentos de la utilización de las imágenes SAR para detección de cambios en la superficie se realizaron en 1992 con imágenes ERS-1 mediante un proyecto conjunto de la Agencia Espacial Europea (ESA), INS Universidad de Stuttgart y el Politécnico de Milán (Prati et al, 1992; Hartl et al, 1992). En este experimento se situaron dos reflectores artificiales llamados, *corner reflectors*, en una zona de estudio cercana a Bonn (Alemania), variando su altura en 1 cm. entre una toma de imagen y la siguiente empleadas para formar un interferograma. Con el procesado detectaron cambios del rango de escasos milímetros (Gens and Genderen, 1996).

Otro ejemplo más práctico de detección de deformación de orden milimétrico en la vertical fue el proporcionado por van Halsema et al.(1995) dentro de investigaciones que se llevaron a cabo en Holanda, relacionadas con la aplicación de la interferometría SAR a la medida precisa de subsidencias del terreno. Para investigar la posibilidades y limitaciones de la técnica se desarrolló el proyecto FEL-TNO usando datos de ERS-1 proporcionados por la ESA (Gens and Genderen, 1996).

En los últimos 15 años, el desarrollo de la técnica DInSAR ha estado íntimamente relacionado con su aplicación con éxito a distintos tipos de procesos de deformación del terreno.

La actividad sísmica es el campo en el que mayor cantidad de estudios se han publicado. Massonet et al.(1993), Peltzer et al.(1996), Rosen et al.(1998) fueron precursores de este tipo de aplicación. Los trabajos en este ámbito han estudiado deformaciones presísmicas, cosísmicas y postsísmicas, escogiendo para realizar el interferograma dos imágenes previas al evento sísmico, una previa y otra posterior o dos posteriores respectivamente. Un ejemplo muy reciente de esta aplicación se muestra en los primeros interferogramas realizados para el estudio de la zona afectada por el terremoto de L'Aquila (Italia) el 6 de Abril de 2009, realizados por el Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell' Ambiente (IREA-CNR) y su interpretación por el Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), que combina una imagen ENVISAT- ASAR pre-sísmica del 1 de Febrero de 2009 con otra post-sísmica de 12 de Abril de 2009 (Figura 2.15). Cada franja de 1

interferograma, que se corresponde con ciclo de color, equivale a un desplazamiento de 2.8cm LOS.

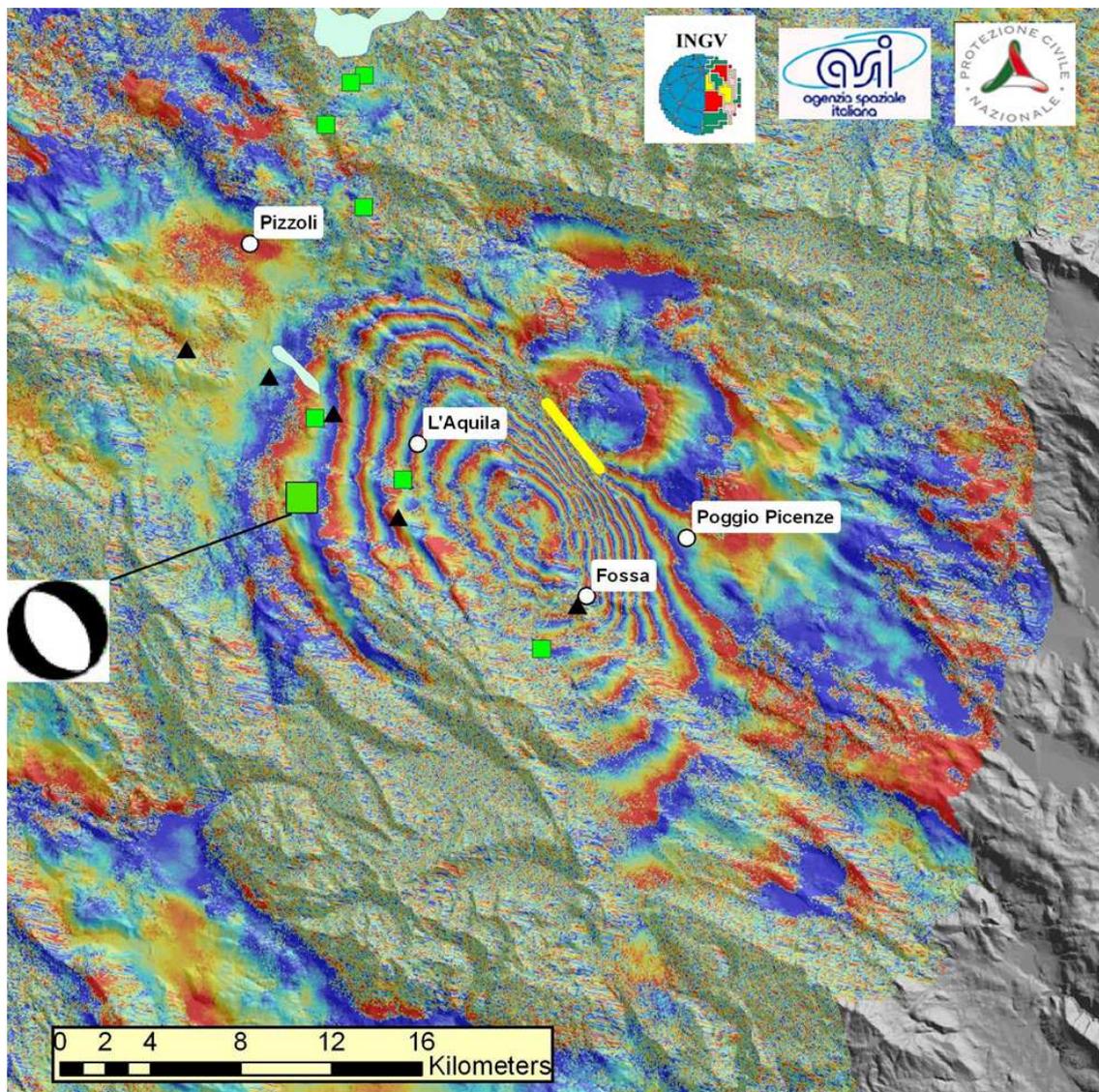


Figura 2.15: interferograma de la zona afectada por el terremoto de L'Aquila en abril de 2009 y su interpretación. El cuadrado verde grande representa el terremoto principal de Magnitud (M)=6.3 y los cuadrados más pequeños réplicas mayores de M=5. Los triángulos negros indican la posición de estaciones GPS usadas para la validación de los datos SAR. La línea amarilla al este de L'Aquila muestra la localización de una superficie de ruptura cosísmica de unos 4 Km de longitud observada en campo por los investigadores del INGV.

En el campo de la vulcanología la técnica DInSAR se ha aplicado satisfactoriamente para los estudios de hundimiento e hinchamiento de volcanes, como los ejemplos recogidos en Massonet and Sigmundsson, (2000) y Amelung et al. (2000). También se han desarrollado estudios glaciológicos, sobre medidas de la velocidad del hielo antártico medidas de la topografía de las capas de hielo (Goldstein et al. 1993, Kwok and Fahnestock, 1996).

En la tabla 2.11 se recogen los primeros trabajos publicados en cada una de estas aplicaciones.

<u>Localización</u>	<u>Referencias</u>
Terremotos	
Kobe, Japón	Ozawa et al, 1997
Terremoto de Landers, California, EEUU	Massonnet et al, 1993; Massonnet and Adragna, 1993; Zebker et al, 1994; Peltzer et al, 1994; Massonnet et el, 1994; Feigl et al, 1995; Peltzer et al, 1996; Massonnet et al, 1996b; Hernandez et al, 1997; Price and Sandwell, 1998; Michel et al, 1999.
Terremoto de Hector, California, EEUU	Sandwell et al, 2000
Terremoto de Manyi, Tibet	Peltzer et al, 1999
Terremoto de Izmit, Turquía	Barbieri et al, 1999; Hanssen et al, 2000; Reilinger et al, 2000.
Valle Eureka, California, EEUU	Massonnet and Feigl, 1995; Peltzer and Rosen, 1995.
Northridge, California, EEUU	Massonnet et el, 1996a; Murakami et al, 1996; Kawai and Shimada, 1994.
Kagoshima-kenhokuseibu, Japón	Fujiwara et al, 1998
Nuweiba, Golfo de Aqaba.	Baer et al, 1999; Klinger et al, 2000.
Grevena, Grecia	Meyer et al, 1996; Clarke et al, 1996
Colfiorito, Umbria-Marche, Italia	Stramondo et al, 1999
Reptación Falla de San Andrés Parkfield, EEUU.	Rosen et al, 1998; Bürgmann et al, 2000.
Volcanes	
Vatnajökull, Islandia	Roth et al, 1997;Thiel et al, 1997
segmento de expansión Krafla, Islandia	Sigmundson et al 1997
Etna, Italia	Massonnet et al, 1995; Briole et al, 1997; Delacourt et al, 1997; Lanari et al, 1998; Williams and Wadge, 1998.
Iwo Jima, Japón	Ohkura, 1998
Península Izu, Japón	Fuliwara et al, 1998
Katmai, Alaska	Lu et al, 1997; Lu and Freymueller, 1999.
Kilauea, Hawaii	Mouginis-Mark, 1995; Rosen et al, 1996; Zebker et al, 1996,1997.
Soufriere Hills, Monserrat	Wadge et al, 1999

<u>Localización</u>	<u>Referencias</u>
Campi Flegrei, Italia	Usai et al, 1999; Avallone et al, 1999; Lundgren et al, 2001.
Caldera de Yellowstone, EEUU	Wicks et al, 1998
Piton de la Fourniase, Reunión	Sigmundsson et al, 1999
Long Valley, California, EEUU	Thatcher and Massonnet, 1996
Unzen, Japón	Fujii et al, 1994
Galapagos	Mouginis-Mark, 1995; Jonsson et al, 1999; Amelung et al, 2000.
Glaciar/ Movimiento de hielo	
Antártico/Patagonia	Goldstein et al, 1993; Hartl et al, 1994a, b; Rott and Siegel, 1997; Rott et al, 1998; Joughin et al, 1999;
Groenlandia	Joughin, 1995; Kwok and Fahnestock, 1996; Joughin et al, 1996; Rignot et al, 1997; Joughin et al, 1997; Mohr, 1997; Mohr et al, 1998; Joughin et al, 1998; Hoen and Zebker, 2000.

Tabla 2.11: Primeros y más importantes eventos estudiados con Interferometría RADAR y principales referencias (modificada de Hanssen, 2001).

Los otros dos campos de aplicación de la técnica DInSAR a las deformaciones de terreno son las subsidencias y los movimientos de ladera que se tratan con más detalle a continuación en los siguientes apartados.

Además, las primeras revisiones de las distintas aplicaciones de la técnica DInSAR y los trabajos en los que se ha empleado se recogen en Massonnet and Feigl (1998) y Hanssen (2001). Existe un enlace en Internet, dentro de la página web de la Agencia Espacial Europea (ESA) que permite conocer los últimos resultados DInSAR basados en imágenes ERS y ENVISAT de los proyectos subvencionados: <http://www.esa.int/esaEO/>

A pesar de la proliferación de aplicaciones del DInSAR en la década de los 90, la técnica presentaba aún ciertos problemas, cuya solución se abordó posteriormente. Esos problemas estaban relacionados con el ruido y los artefactos (distorsión sistemática) producidos durante la adquisición de los datos y el procesado (Zhou et al, 2003). El ruido se crea por la decorrelación temporal entre el tiempo de adquisición de las dos imágenes que intervienen en el interferograma, mientras que la variación espacial y temporal en la atmósfera crea artefactos que suelen ser

difíciles de distinguir de la deformación del terreno (Zhou et al, 2003). La aparición de las técnicas DInSAR multi interferograma o avanzadas A-DInSAR, (Ferretti et al, 2000; Berardino et al, 2002; Werner et al, 2003; Mora et al, 2003) constituyó un avance importante en el estudio de la deformación del terreno con DInSAR, ya que permiten una estimación cuantitativa, dada la redundancia de datos, un aumento de precisión a valores del orden milimétrico y un análisis temporal mucho más amplio basado en múltiples interferogramas reduciendo el riesgo de pérdida de coherencia por decorrelación temporal (Crosetto et al, 2005). Los detalles de cada una de ellas, así como sus ventajas, se encuentran recogidos en el Apartado 2.2.1. Sus aplicaciones e implementación en softwares comerciales y su uso cada vez más difundido constituyen el presente de la técnica.

2.3.2.-APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DINSAR AL ESTUDIO DE SUBSIDENCIAS.

Son ya numerosas las publicaciones que dan cuenta de resultados en distintas regiones del mundo y en diferentes contextos. La mayor parte de los trabajos publicados hacen referencia a subsidencias causadas por la actividad minera (Camec et al, 1996; Carnec and Delacourt, 2000; Strozzi et al, 2003; Raucoules et al, 2003; Crosetto et al, 2005; Jung et al, 2007; Herrera et al, 2007; Mei et al, 2008;) y la extracción de agua o sobreexplotación de acuíferos (Carnec and Fabriol, 1999; Sneed et al, 2001; Zhou et al, 2003; Strozzi et al, 2003; Chang et al, 2004; Teatini et al, 2005; Tomás et al, 2005; Fruneau et al, 2005; Zhang et al, 2007; Stramondo et al, 2007, Finnegan et al, 2008). De entre todos los trabajos consultados se ha realizado una selección de aquellos más significativos relacionados con la extracción de agua o sobreexplotación de acuíferos, ya que es la actividad con la que se relacionan los casos de subsidencias, detectados por primera vez, estudiados en el área metropolitana de Granada como resultado de esta investigación (Tabla 2.12).

Con ellos se abarcan zonas de estudio en Europa, América y Asia, y en ambientes con diferentes condiciones climáticas: semidesérticas, mediterráneas, continentales y oceánicas.

Nº	Técnica			Extensión		Imag usadas		Intervalo temporal			N. imag		Estudios complementarios				Tipo de subsidencia					
	Ref.	InSAR	DInSAR	ADInSAR	ha	Km ²	ERS 1-2	Otras	Mes-1año	1-2 años	2-10 años	2-10	+10	nivela ción	GPS	Exten som.	otras	Extracción agua	Minería	Tectónica	No espe cificado	Otros
1	X				X	X			X		X					X	X					
2	X				X	X				X	X		X				X					
3	X				X						X			X			X					
4	X				X					X	X			X			X					
5	X				X					X				X			X					
6		X			X	X			X		X		X			X(geoest)	X					
7	X(3)	X (1),(2)		X(2)	X(1)	X(3)	X JERS	X(2), X(3)		X(1)	X(1, 2, 3)		X			X(ERS DInSAR)	X(1, 2)	X(3)				
8		X			X	X				X	X					X(agua subt red pozos)	X					
9			X (SBAS)	X		X				X		X	X								X	
10			X (IPTA)		X	X				X		X	X	X		X DInSAR)	X					
11			X (CPT)		X	X				X		X			X	X(piez)	X					
12		X		X		X				X		X	X			X(piez)	X					
13			X (PS)		X		X RADAR SAT			X		X					X (drenaje)					X(consolida ción)
14		X			X	X	X ENVISAT			X	X		X									
15			X (SBAS)		X	X				X		X	X				X		X			
16		X			X	X	X RADAR SAT1			X		X		X			X		X			
17			X(SPN-CPT)		X	X	X ENVISAT			X		X			X		X					
18			X (IPTA)		X	X	X ENVISAT			X		X				X(Inf. geotéc nica)						X(consolida ción)
19			X(simplific ado)		X		X ENVISAT			X		X				X (sondeos, piez, ...).			X(2)			X (prop. geotécnicas)
20			X (PS)		X	X				X		X	X	X			X	X				X(hidrotermal

Tabla 2.12: resumen del análisis de trabajos publicados con técnica SAR sobre subsidencias.

NUMERACIÓN ARTÍCULOS INCLUIDOS EN LA TABLA:

1. 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 Resour. Res.* 98 Vol. 34, N^o. 10 , p. 2573.
2. Amelung F., Galloway D. L., Bell J. W., Zebker H. A., and Lacznia R. J. 1999. Sensing the ups and downs of Las Vegas; InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*; June 1999; v. 27; no. 6; p. 483-486. DOI: 10.1130/0091-7613(1999)027.
3. Hoffman, J., Zebker, H.A., Galloway D.L., Amelung F. (2001). Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry. *Water Resources Research*, Vol 37, N^o. 6, 1551–1566, 2001
4. Sneed, M., Ikehara, M., Ballouay, D., Amelung, F., 2001. Detection and measurement of land subsidence using global positioning system and interferometric synthetic aperture radar, Coachella Valley, California, 1996–1998. *Water-Resources Investigations*. Report 01-4193, US Geological Survey, USA.
5. Bell J. W., Ramelli A. R. and Blewitt G. 2002. Land Subsidence in Las Vegas, Nevada, 1935–2000: New Geodetic Data Show Evolution, Revised Spatial Patterns, and Reduced Rates. *Environmental and Engineering Geoscience*; August 2002; v. 8; no. 3; p. 155-174; doi: 10.2113/8.3.155.
6. Zhou Y., Stein A. and Molenaar M. (2003). Integrating interferometric SAR data with levelling measurements of land subsidence using geostatistics. *International Journal of Remote Sensing* 24: 18, 3547 – 3563. doi:10.1080/0143116021000023880.
7. Strozzi T., U. Wegmüller, C. L. Werner, A. Wiesmann, V. Spreckels, 2003. JERS SAR Interferometry for Land Subsidence Monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 7, July 2003, pp 1702-1708.
8. Chang C.P., Chang T.Y., Wang C.T., Kuo C.H., Chen K.S. 2004. Land-surface deformation corresponding to seasonal ground-water fluctuation, determining by SAR interferometry in the SW Taiwan. *Mathematics and Computers in Simulation* 67 (2004) 351–359. doi:10.1016/j.matcom.2004.06.003
9. Lanari R., Zeni G., Manunta M., Guarino S., Berardino P. and Sansosti E. 2004. An integrated SAR/GIS approach for investigating urban deformation phenomena: a case of study of the city of Naples, Italy. *Int. J. Remote Sensing*, 20 July, 2004 vol 25, n^o14, 2855-2862. doi: 10.1080/01431160310001647750.
10. Teatini P., L. Tosi, T. Strozzi, L. Carbognin, U. Wegmüller, F. Rizzetto. 2005. Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system. *Remote Sensing of Environment* 98 (2005) 403 – 413. doi:10.1016/j.rse.2005.08.002
11. Tomás R., Y. Márquez, J. M. Lopez-Sanchez, J. Delgado, P. Blanco, J.J. Mallorquí, M.Martínez, G. Herrera, J. Mulas. 2005. Mapping ground subsidence induced by aquifer

- overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of Environment* 98 (2005) 269 – 283. doi:10.1016/j.rse.2005.08.003.
12. Fruneau, B.; Deffontaines, B.; Rudant, J.P. and Le Parmentier A.M. (2005). monitoring vertical deformation due to water pumping in the city of Paris (France) with differential Interferometry. *C.R. Geoscience*, 337, 1173-1183. doi:10.1016/j.crte.2005.05.014
 13. Dixon, T.H., Amelung, F., Ferretti A., Novali, F., Rocca, F., Dokka, R., Sellall, G., Kim, S.-W., Wdowinski, S., and Whitman, D. (2006). Subsidence and flooding in New Orleans. *Nature*, 441, 587-588. doi:10.1038/441587a
 14. Zhang Q., Zhao C., Din X. and Peng, J. 2007. Monitoring Xian Land Subsidence Evolution by Differential SAR Interferometry, en *Geomatics Solutions for Disaster Management*. Edited by J. Li, S. Zlatanova, A. G. Fabbri. New York. Springer, 2007.
 15. Stramondo S., M. Saroli, C. Tolomei, M. Moro, F. Doumaz, A. Pesci, F. Loddo, P. Baldi, E. Boschi. 2007. Surface movements in Bologna (Po Plain, Italy) detected by multitemporal DInSAR. *Remote Sensing of Environment*. 110 (2007) 304-316. doi:10.1016/j.rse.2007.02.023.
 16. Finnegan, N.J., Pritchard, M. E., Lohman, R. B and Lundgren, P. R. 2008. Constrains on surface deformation in the Seattle, WA, urban corridor from satellite radar interferometry time –series analysis. *Geophysical Journal International*, 174, 29-41.
 17. Herrera, G., Tomás R., Lopez-Sanchez J.M., Delgado J., Vicente, F., Mulas, J., Cooksley, G., Sanchez, M., Duro, J., Arnaud, A., Blanco, P., Duque S., Mallorqui J.J., De la Vega-Panizo, R., Monserrat, O. 2008. Validation and comparison of Advanced Differential Interferometry Techniques: Murcia metropolitan area case study. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. Article in Press. doi:10.1016/j.isprsjprs.2008.09.008.
 18. Stramondo S., M. Saroli, C. Tolomei, M. Moro, F. Doumaz, A. Pesci, F. Loddo, P. Baldi, E. Boschi. 2007. Surface movements in Bologna (Po Plain, Italy) detected by multitemporal DInSAR. *Remote Sensing of Environment*. 110 (2007) 304-316. doi:10.1016/j.rse.2007.02.023.
 19. Vallone, P., Giammarinaro, M.S., Crosetto, M., Agudo, M., Biescas, E. (2008). Ground motion phenomena in Caltanissetta (Italy) investigated by InSAR and geological data integration. *Engineering Geology*, 98, 144-155
 20. Vilaro, G., Ventura G., Terranova C., Matano F., Nardò S. 2009. Ground deformation due to tectonic, hydrothermal, gravity, hydrogeological, and anthropic processes in the Campania Region (Southern Italy) from Permanent Scatterers Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Remote Sensing of Environment* 113, 197–212.

En los casos en los que en un artículo se incluyen varios casos, la información que corresponde a cada uno de ellos está incorporada en la tabla con el número de la zona de estudio junto a la X.

Análisis de las informaciones mostradas en la tabla

El análisis se ha realizado a partir de los datos reflejados en la tabla T y teniendo en cuenta el número de casos de cada una de las categorías de información que se han diferenciado. (Figura 2.16)

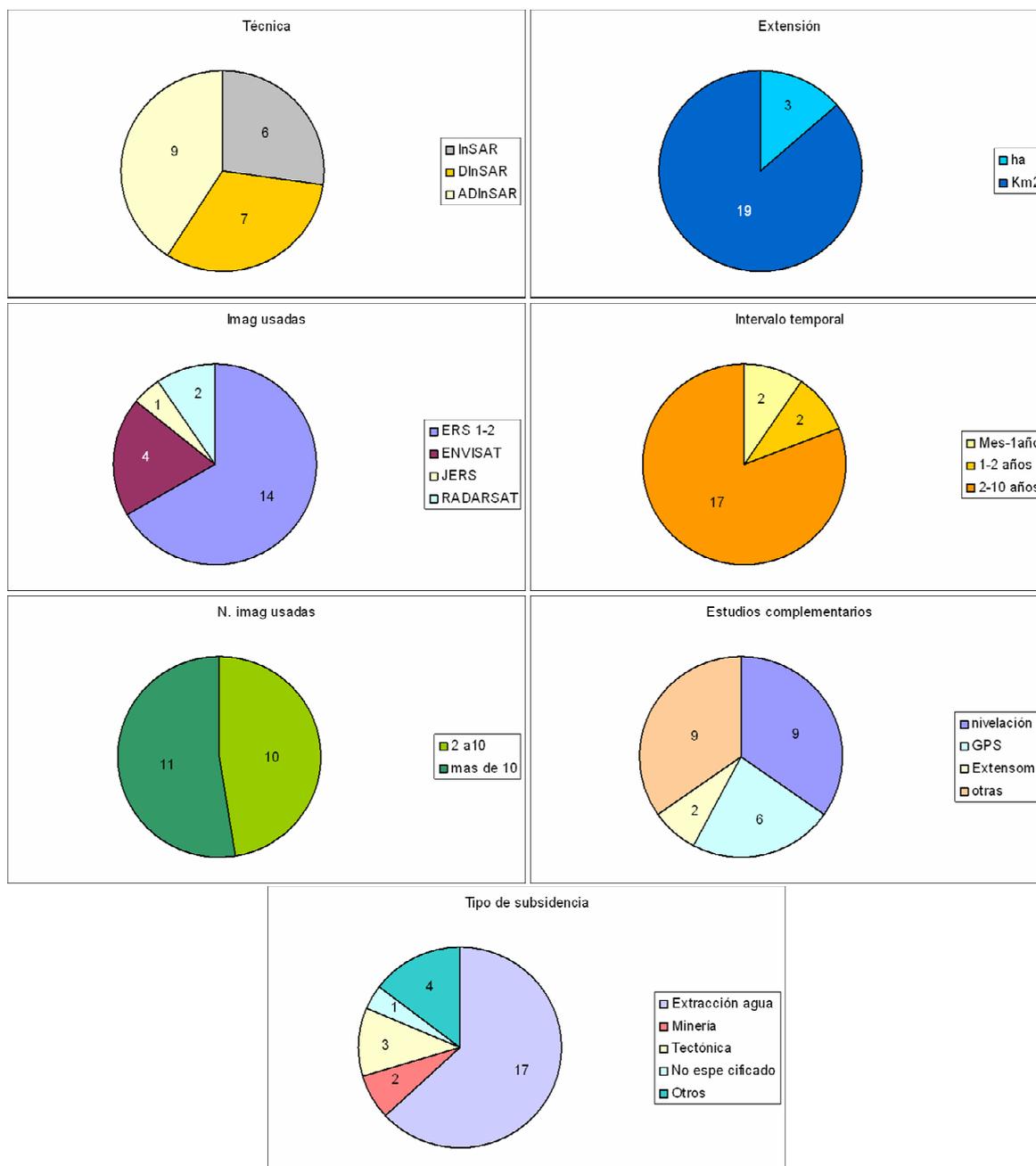


Figura 2.16: gráficos de análisis de la información de la tabla T por categorías

La técnica utilizada para los estudios ha ido variando a lo largo del tiempo. En los primeros estudios se empleó InSAR (un total de 6), mientras que en los más recientes se han empleado diferentes algoritmos ADInSAR (9). La extensión territorial estudiada es

en la mayoría de los casos (19), del orden de Km² y en el resto del orden de ha (3). Con respecto a las imágenes usadas, la mayoría de los estudios (14) se han realizado con ERS 1 -2. Hay 4 estudios en los que se han empleado imágenes ENVISAT y 2 con RADARSAT solas o combinadas con ERS1-2, además de 1 con JERS. En cuanto al número de imágenes usadas se utilizan menos de 10 en 10 de los casos y más de 10 en 11, incluyendo todos los A-DInSAR. Entre los intervalos temporales abarcados por los estudios predominan los que están comprendidos entre 2 y 10 años (17). Dentro de los trabajos analizados se han incluido estudios complementarios en todos los casos salvo en Dixon et al, 2006, (número de referencia 13). Aunque la selección se ha centrado en investigaciones de subsidencias debidas a la extracción de agua (17), en 2 casos la subsidencia se debe a actividades mineras, en 3 está relacionada con la tectónica y en 4 con otras causas.

2.3.3.-APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DINSAR AL ESTUDIO DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA/ DESLIZAMIENTOS

Para tener una perspectiva de los estudios que se han realizado aplicando la interferometría DInSAR a los movimientos de ladera se ha procedido a la realización de una revisión de trabajos publicados en revistas y reuniones científicas internacionales.

El total de trabajos analizados ha sido de 51 y abarcan desde el año 1996 al 2009. El listado completo se recoge en el apartado de la bibliografía incluyendo la numeración asignada.

El análisis más detallado de dichos documentos se ha centrado en los más representativos de aquellos que se han publicado como artículos en revistas internacionales, un total de 18, cuyo resumen se recoge en la tabla 2.13.

Esta tabla presenta aspectos como la técnica utilizada, el ámbito territorial estudiado, las imágenes usadas, el intervalo temporal cubierto, el número de imágenes usadas, la existencia de otro tipo de estudios complementarios en la zona y tipos de movimientos estudiados.

Art N°	Técnica			Ámbito territorial			Imag usadas		Intervalo temporal			Número imag usadas			Existencia estudios complementarios		Tipo de movimientos: DESLIZAMIENTO				
	InSAR	DInSAR	PS	m²	ha	Km²	ERS 1-2 ENVI SAT	JERS	Mes-l año	1-2 años	2-10 años	2	2-10	+10	No	Si	Traslacional	Rotacional	Complejo	No especificado	Otros
1	X			X			X		X				X		X	X					
6		X				X	X			X		X			X	X evolucion	reptación				
7		X			X		X			X		X			X				X		
10		X				X	X			X		X			X				X		
16		X	X			X	X			X			X		X			X			
18		X				X		X			X			X						X	
19		X			X		X			X		X									X
20		X	X			X	X			X			X			X					
24		X			X(3)	X(1)	X(1)	X(1)	X(1)	X(3)		X(1)		X(3)	X(1)	X(4)			X(1)		
						X(2)	X(3)	X(2)	X(2)			X(2)			X(2)				X(2)		
						X(4)	X(4)	X(4)	X(4)			X(3)			X(4)				X(3)		
							X(4)					X(4)									
30		X			X		X			X			X		X	X					
38		X				X		X				X			X			X			
39		X	X			X	X			X			X	X					X		
40		X	X		X		X			X			X		X	X					
41		X	X			X	X			X			X		X				X		
42		X	X			X	X			X			X	X(3)	X(1)				X		
															X(4)						
43		X	X			X	X			X			X		X				X		
45		X			X		X			X			X		X					X	
47		X			X		Xenvi			X			X		X				X		

Tabla 2.13: resumen del análisis de trabajos publicados con técnica SAR sobre movimientos de ladera.

NUMERACIÓN ARTÍCULOS INCLUIDOS EN LA TABLA:

1. Fruneau, B., Achache, J., Delacourt, C. 1996. Observation and modelling of the Saint-Etienne de Tinee landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, 265 (3–4), 181-190.
6. Rott H., Scheuchl B. and Siegel A. 1999. Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: A case study from a mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps, Austria. *Geophysical Research Letters* Vol. 26, No. 11 , 1629-1632.
7. Rizo V. et al.. 2000. SAR Interferometry and Field Data of Randazzo Landslide (Eastern Sicily, Italy). *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology*, Vol. 25, No. 9, 771-780.
10. Berardino P., Constantini M., Franceschetti G., Iodice A., Pietranera L. and Rizzo V. 2003. Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy). *Engineering Geology*, 68, 31-51. doi:10.1016/S0013-7952(02)00196-5.
16. Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. 2003. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, 68, 3-14. doi:10.1016/S0013-7952(02)00195-3.
18. Catani F., Farina P., Moretti S., Nico G. and Strozzi T. On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: estimation of landform attributes and mass movements. *Geomorphology*, v. 66, iss. 1-4 [SPECIAL ISSUE], 119-131. doi:10.1016/j.geomorph.2004.08.012
19. Singhroy V. and Molch K. 2004. Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques. *Advances in Space Research* Volume 33, Issue 3, 290-295.
20. Hilley, G.E., Bürgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., Rocca, F..2004. Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis. *Science*, 304, 1952-1955.
24. Strozzi, T., P. Farina, A. Corsini, C. Ambrosi, M. Thüning, J. Zilger, A. Wiesmann, U. Wegmüller and C. Werner. 2005. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides* 2 (3), 193-201. doi:10.1007/s10346-005-0003-2.
30. Squarzoni C., Delacourt C., Allemand, P. 2003. Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry. *Engineering Geology*, 68, 53-66.
- 38: Kimura, H., Yamaguchi, Y., 2000. Detection of landslide areas using satellite radar interferometry. , *Photogramm Eng Rem S*, 66 (3), 337-344.
39. Bovenga, F.; Nutricato, R.; Refice, A.; Wasowski, J. 2006. Application of multi-temporal differential interferometry to slope instability detection in urban/peri-urban areas. *Engineering Geology*, 2006/12/15, 88, 3-4, 218-239. doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.015.
40. Colesanti, C. and Wasowski, J., 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88, 3-4, 173-199. doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.013.

41. P. Farina, D. Colombo, A. Fumagalli, F. Marks, S. Moretti. 2006. Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. *Engineering Geology* 88, 200-217. doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.007.
42. C. Meisina, F. Zucca, D. Fossati, M. Ceriani, J. Allievi. 2006. Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: The example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy). *Engineering Geology* 88, 240–259. doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.010.
43. C. Meisina, F. Zucca, F. Conconia, F. Verria, D. Fossati, M. Ceriani, J. Allievi. 2007. Use of Permanent Scatterers technique for large-scale mass movement investigation. *Quaternary International* 171-172, 90-107. doi:10.1016/j.quaint.2006.12.011.
45. A. Corsini; P. Farina; G. Antonello; M. Barbieri; N. Casagli; F. Coren; L. Guerri; F. Ronchetti; P. Sterzai; D. Tarchi. 2006. Space-borne and ground-based SAR interferometry as tools for landslide hazard management in civil protection. *International Journal of Remote Sensing*, 27:12, 2351-2369. doi:10.1080/01431160600554405.
47. Peyret, M., Djamour Y., Rizza M., Ritz J.-F., Hurtrez J.-E., Goudarzi M.A., Nankali H., Chéry J., Le Dortz K., Uri F. 2008. Monitoring of the large slow Kahrod landslide in Alborz mountain range (Iran) by GPS and SAR interferometry. *Engineering Geology* 100, 131–141.

En los casos en los que en un artículo se incluyen varios movimientos, la información que corresponde a cada uno de ellos está incorporada en la tabla con el número del deslizamiento dentro del artículo junto a la X.

Nota: en el artículo 42 se incluyen 4 movimientos, si bien el número 2 es un movimiento inactivo en el que los resultados de movimiento están asociados a asientos diferenciales del terreno reciente.

Análisis de los resultados mostrados en la tabla.

A partir de los datos reflejados en la tabla y teniendo en cuenta las distintas categorías se ha analizado la información según la cantidad de casos de cada uno de ellos. (Figura 2.17).

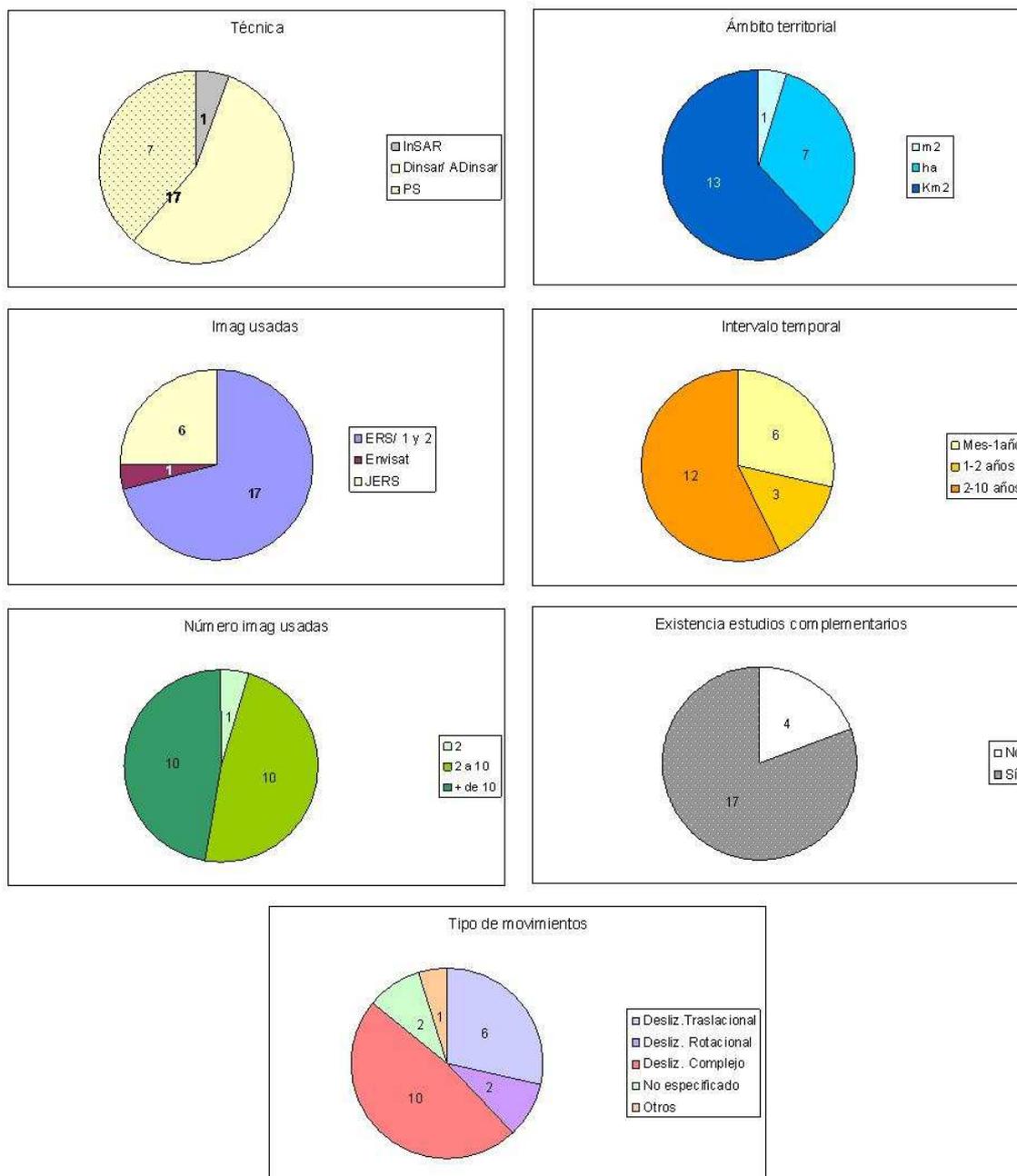


Figura 2.17: gráficos de análisis de la información de la tabla T por categorías.

Con respecto a la técnica salvo Fruneau et al. (1996) (referencia1), que emplea InSAR y es el más antiguo, el resto de los artículos utilizaron DInSAR. De las 17 investigaciones en 7 se empleó la técnica multi interferogramas de Persistent Scatterers (PS).

En cuanto al ámbito territorial de estudio, la mayor parte de las investigaciones cubren una zona del orden de kilómetros cuadrados.

Las imágenes usadas en los trabajos analizados corresponden a dos satélites: ERS1/2 en 17 de las zonas de estudio incluidas en los artículos y JERS en 6 de ellas, de las cuales

sólo 2 se han estudiado únicamente con estas imágenes y 4 en combinación con imágenes ERS. Sólo 1 de los artículos seleccionados, el nº 47 ha utilizado imágenes del satélite europeo ENVISAT, mientras que no hay ninguno seleccionado que haya trabajado con imágenes del canadiense RADARSAT aplicando InSAR o DInSAR, si bien en los artículos Singhroy and Molch, 2004-b y Bulmer et al, 2006 se usan imágenes RADARSAT para el estudio interferométrico de movimientos de ladera.

El intervalo temporal que cubren los casos es principalmente de 2 a 10 años, si bien hay 6 casos en los que se hace un análisis a corto plazo (menos de un año), que se corresponde con algún evento o aumento de la actividad en el movimiento analizado.

El número de imágenes usadas en 10 de los casos está entre 2 y 10 y hay 10 casos en los que se han usado más de 10 imágenes. De éstos 7 son los correspondientes a la aplicación de la técnica multi interferograma PS.

La existencia de estudios complementarios es la tónica general en las investigaciones que aplican DInSAR a los movimientos de ladera. Se realizaron previamente al análisis InSAR/DInSAR y se basaron en informaciones cuantitativas sobre los movimientos de ladera obtenidos mediante técnicas “in situ” (nivelación y GPS fundamentalmente). De los 4 casos en los que no hay información cuantitativa adicional, 3 partieron del conocimiento previo de los movimientos de ladera y sus características cualitativas. Sólo en un caso se desconocía la existencia del movimiento, que fue descubierto como resultado de la aplicación de la técnica DInSAR.

Los tipos de movimientos de laderas que se estudian en los trabajos considerados son fundamentalmente complejos (10), seguidos de deslizamientos traslacionales (6) y rotacionales (2). En 2 casos no se especifica el tipo de movimiento y un caso corresponde a avalancha de rocas. En general incorporan macizos rocosos o suelos geotécnicos muy consolidados.

3.-OBJETIVOS

La investigación desarrollada afronta objetivos que engloban dos puntos de vista complementarios: la ingeniería del terreno y la geomática. Se pueden dividir en dos tipos: generales y específicos.

3.1.-Objetivos Generales:

- Contribución a la puesta a punto de una metodología DInSAR para el estudio de deformaciones progresivas de terrenos en el ámbito mediterráneo.
- Validación de la metodología específica DInSAR desarrollada por el Instituto de Geomática para la aplicación al estudio de deslizamientos y movimientos de ladera en el ámbito nacional e Internacional.

3.2.-Objetivos Específicos:

A) Zonas subsidentes no relacionadas con problemas de estabilidad de ladera:

- Aplicación de la metodología DInSAR como herramienta de detección temprana de deformaciones en áreas de expansión urbana de la provincia de Granada.

B) Zonas de movimientos de ladera

- Aplicar la metodología DInSAR a los movimientos de laderas detectados e inventariados en la cuenca del río Guadalfeo
- Cuantificación de la actividad de los movimientos de ladera mediante la técnica DInSAR: Estimar la velocidad de los movimientos detectados mediante DInSAR en la cuenca del río Guadalfeo.
- Aportar nuevos datos sobre los deslizamientos y movimientos de ladera inventariados y contribuir al conocimiento de la peligrosidad de tales movimientos

4.-METODOLOGÍA EMPLEADA

La parte fundamental se centró inicialmente en la metodología DInSAR aplicada a las imágenes adquiridas para el estudio de los movimientos del terreno, aunque los resultados obtenidos permitieron ampliar la temática a todos los procesos que implican deformaciones del terreno detectados con DInSAR. Se han considerado una serie de fases previas y posteriores al análisis necesarias para poder realizar el estudio con DInSAR de forma satisfactoria.

La metodología se desglosa en tres etapas fundamentales (Figura 4.1):

- 1.- PRE DInSAR
- 2.-DInSAR
- 3.-POST DInSAR

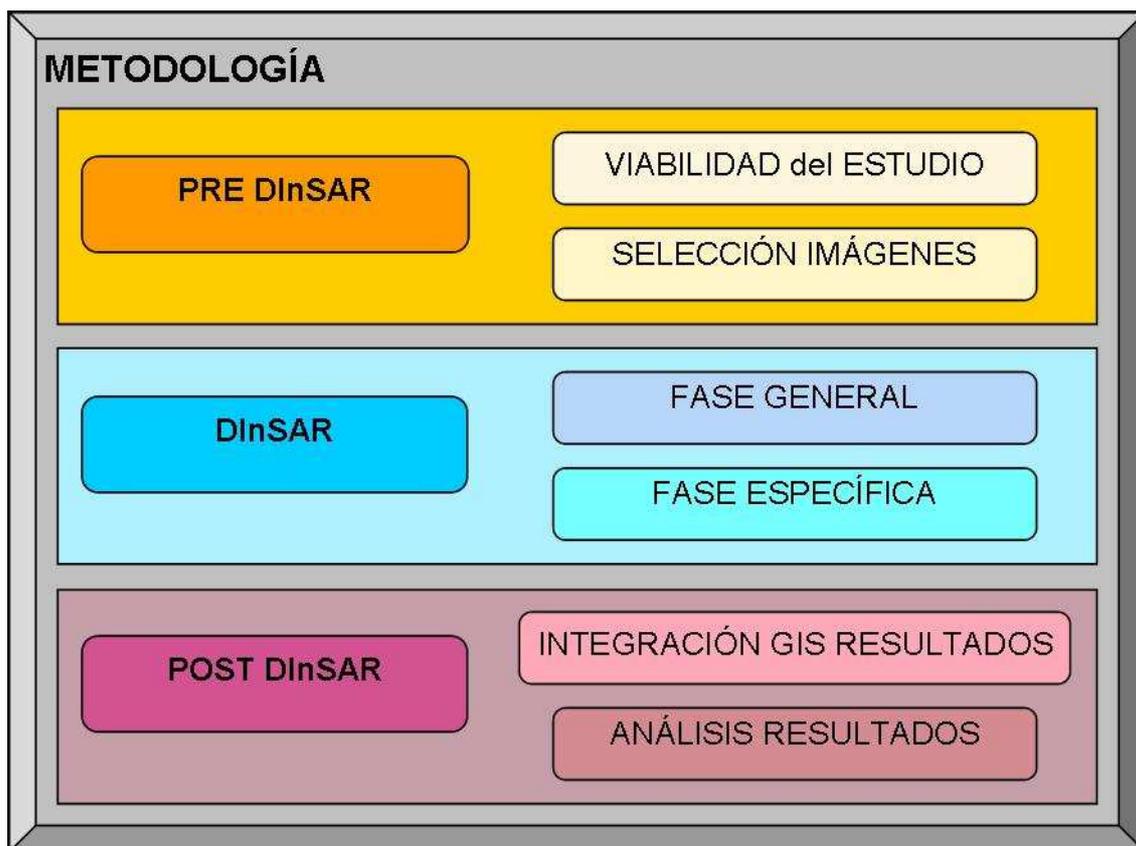


Figura 4.1: Esquema de la metodología.

4.1.-PREDInSAR

Dentro de este paso hay que considerar los aspectos preliminares a tener en cuenta antes de realizar un estudio del terreno con DInSAR.

4.1.1.- Análisis de la viabilidad del estudio con la técnica DInSAR

La aplicación de la interferometría diferencial SAR al estudio de las deformaciones del terreno implica el cumplimiento de unos requisitos, que pueden dividirse en tres grandes categorías:

- los que hacen referencia al proceso geológico subyacente,
- los datos/imágenes disponibles para su estudio y
- selección de la metodología DInSAR.

Una síntesis de estos requisitos se muestra en la Figura 4.2.

Lo primero a considerar son las **Características del Proceso** a estudiar, que a la luz de los resultados obtenidos han sido movimientos de ladera y subsidencias.

En primer lugar hay que tener en cuenta la **extensión** de la zona afectada. Es evidente que la zona afectada por desplazamientos debe de ser bastante mayor que la resolución espacial del sensor formador de imágenes, con el fin de poder apreciar la extensión del terreno afectado y las velocidades que se registran en diferentes puntos de la zona. Para el caso de las imágenes RADAR de los satélites europeos ERS 1-2 y ENVISAT, la dimensión del píxel en las imágenes focalizadas SLC es de 20x4 m. aproximadamente (píxel rectangular). Para trabajar con píxeles cuadrados, la resolución mínima es de 20x20m. Dado que las imágenes cubren un espacio de 100x100Km, se pueden estudiar movimientos de escalas comprendidas entre la de una parcela y la regional (Tabla 4.1).

Escala Espacial	Dimensión (Km)	DInSAR
Parcela	0-1	Sí
Paisaje	1-10	Sí
Mesoescala	10-100	Sí
Regional	100-1000	Sí
Continental	1000-10000	No

Tabla 4.1: Capacidad de estudio de los movimientos con DInSAR transportado en satélites tomando como referencia la escala espacial estándar de usada ecología. Modificado de Canuti et al, 2004.

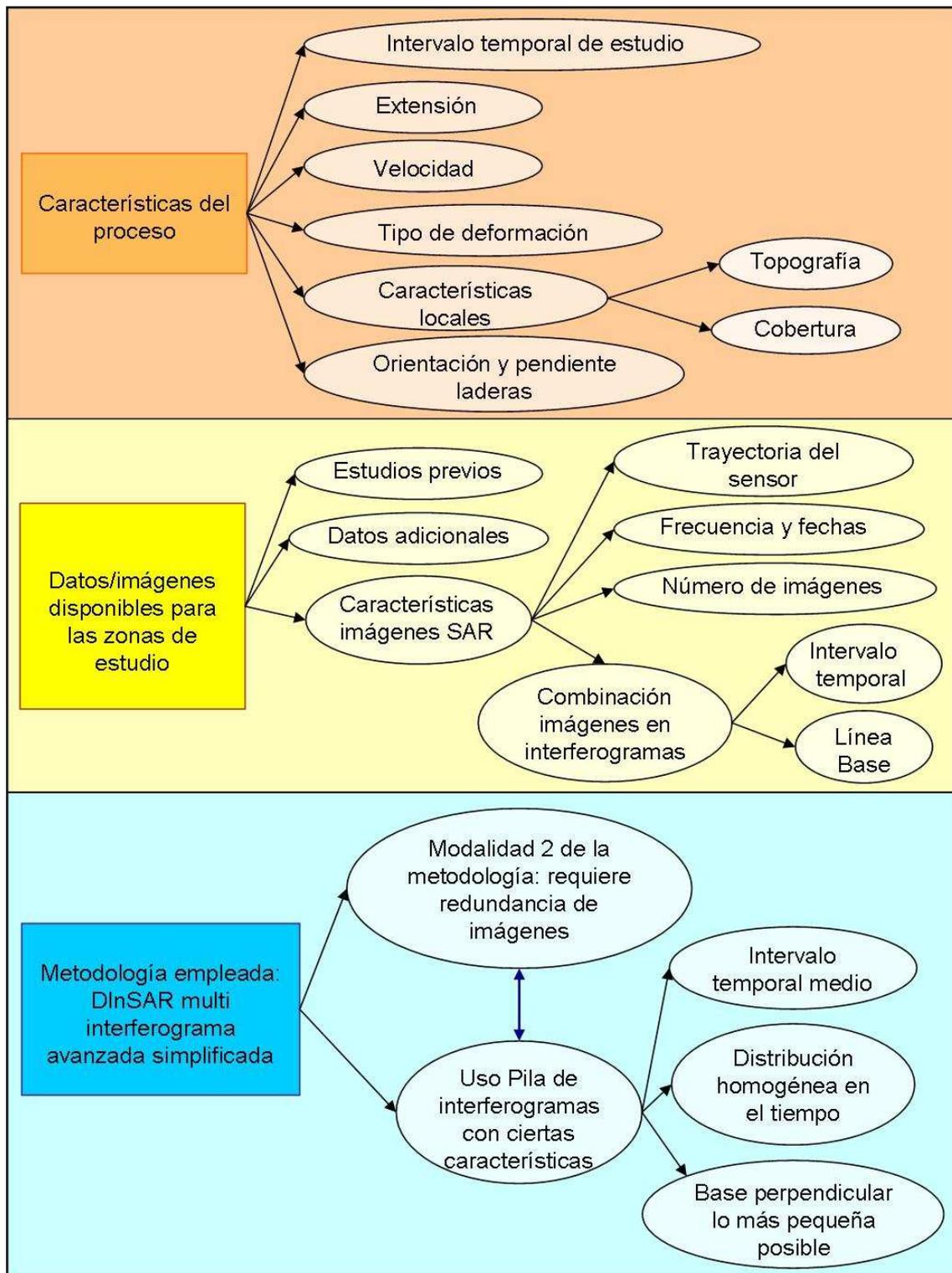


Figura 4.2: Síntesis de requisitos para el estudio de deformaciones del terreno con DInSAR.

Igualmente es necesario considerar el factor tiempo, para determinar el **intervalo temporal** que abarcará el estudio. En este sentido hay que tener presente la periodicidad en la toma de imágenes sucesivas del sensor, ya que determinará el intervalo mínimo de realización de un interferograma (Canuti et al, 2004). En el caso de combinar imágenes

de los satélites ERS1 y ERS2, la periodicidad se reduce, llegando a ser de un día. Si consideramos sólo imágenes de uno de los dos satélites, la periodicidad mínima es de 35 días. La relación entre las escalas temporales de los fenómenos y la capacidad del DInSAR transportado en satélites se relaciona en la Tabla 4.2.

Escala temporal	DInSAR	DInSAR combinando ERS1 y ERS2
Segundo	No	No
Minuto	No	No
Hora	No	No
Día	No	Sí
Semana	No	Sí
Mes	Sí	Sí
Año	Sí	Sí
Década	Sí	Sí

Tabla 4.2: Capacidad del DInSAR espacial a diferentes escalas temporales. Modificado de Canuti et al, 2004

Relacionado con el factor tiempo está también la **velocidad** esperada de la deformación del terreno. Si las deformaciones son demasiado rápidas no podrán ser analizadas con DInSAR, ya que el interferograma diferencial no detectará los cambios producidos. Si se trata de deformaciones demasiado lentas, como pueden ser las de origen tectónico, la velocidad estimada con DInSAR podría estar por debajo de los límites de precisión, por lo que no sería posible evaluarlas. En la Tabla 4.3 se presenta la escala de velocidad propuesta por la IUGS/WGL (1995), para los movimientos de ladera, coincidente con la recogida en Cruden y Varnes (1996), y la capacidad del DInSAR transportado en satélites para evaluar las tasas de desplazamiento.

Clase	Descripción	Velocidad	Velocidad m/s	DInSAR
1	Extremadamente lento	<16mm/año	$5 \cdot 10^{-10}$ m/s	Sí
2	Muy Lento	1,6 m/año	$5 \cdot 10^{-8}$ m/s	Parcialmente
3	Lento	13 m/mes	$5 \cdot 10^{-6}$ m/s	No
4	Moderado	1,8 m/h	$5 \cdot 10^{-4}$ m/s	No
5	Rápido	3 m/min	$5 \cdot 10^{-2}$ m/s	No
6	Muy rápido	5 m/s	5 m/s	No
7	Extremadamente rápido	>5 m/s	>5 m/s	No

Tabla 4.3: Capacidad del DInSAR transportado en satélites a diferentes escalas de velocidad. Modificado de Canuti et al, 2004.

También es necesario considerar el **tipo de desplazamiento**. Cuando obtenemos una estimación de la deformación vertical de un determinado terreno con DInSAR, la velocidad estimada está referida a la línea de visión del sensor o *Line of sight* (LOS), que en el caso de los satélites europeos ERS y ENVISAT es de unos 23° con respecto a la vertical. Los deslizamientos rotacionales, por ejemplo, serán más difíciles de ver con esta técnica, al producirse en ellos una rotación de la masa y de la superficie del terreno bajo el escarpe principal, que supone una redistribución espacial de la superficie de la masa en movimiento, la parte superior se hunde y rota hacia el escarpe mientras la inferior se levanta y suaviza su inclinación. Por el contrario durante los movimientos traslacionales, en los que la masa se desplaza exclusivamente hacia abajo y hacia delante, por lo que, al ser un movimiento más simple, se podrá estudiar más fácilmente, en términos generales, con este tipo de técnica.

También hay que considerar las **características locales** en la zona en que se produce la deformación, que permitan su detección, muy especialmente en lo referente a la topografía, la vegetación y las obras y la existencia de edificaciones. En el caso de la topografía conviene comprobar si la zona en movimiento se encuentra en una ladera o si están implicadas varias, así como analizar la pendiente de las laderas, la orientación relativa entre ellas y si se aprecian cambios bruscos de pendiente. Todo ello va a influir en que la zona pueda ser registrada de forma adecuada en la imagen SAR y en que sea posible obtener una medición del desplazamiento. La cobertura de la superficie a analizar es un factor fundamental, ya que en función de ella vamos a tener una zona favorable para el estudio o no. En este sentido aquellos tipos de cobertura que varíen en el tiempo serán inabordables en el análisis, puesto que generarán ruido en los interferogramas. Este es el caso de la vegetación, por el efecto estacional vegetativo, o del agua por el efecto del oleaje superficial o, especialmente, de los terrenos erosionables como los suelos blandos o macizos rocosos alterados. Así pues, el tipo de coberturas óptimas para el estudio con DInSAR son las permanentes en el tiempo, como son los afloramientos rocosos poco alterados, las construcciones y edificaciones, como viviendas y obras civiles de cierta dimensión.

Otro factor a tener en cuenta es la **orientación y pendiente tanto de las laderas** afectadas como de su entorno inmediato. Está relacionado con la dirección e inclinación de la toma de imágenes de los satélites SAR. La influencia de la orientación de la

superficie del terreno estudiado sobre la capacidad de detección del sensor SAR está relacionada con la dirección de desplazamiento y su línea de visión (LOS). La trayectoria del sensor, tanto ascendente como descendente, es próxima a la dirección N-S, con una desviación de 8.5° (Figura 4.3). La LOS es perpendicular a la trayectoria, de forma que en las imágenes ascendentes la LOS forma con el Norte un ángulo de 81.5° y las descendentes 278.5° , con un desplazamiento angular relativo de 197° (Figura 4.3).

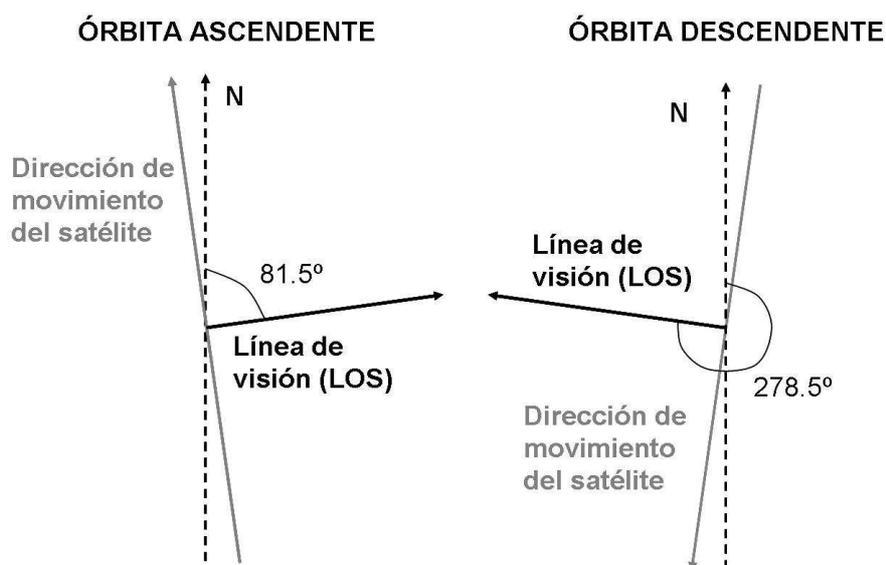


Figura 4.3: visión planimétrica de la geometría de adquisición del sensor. Modificado de Farina et al (2006).

La influencia de la pendiente del terreno se debe a la inclinación de la LOS y a los efectos geométricos que produce en las imágenes, como ya se ha comentado en el Capítulo 2. Así, las vertientes que pueden ser analizadas presentan una pendiente menor de 67° , si bien en cada trayectoria del sensor se podrán estudiar las que tengan orientación Este (ascendente) u Oeste (descendente) (Tabla 4.4). En el caso de zonas llanas se pueden usar imágenes de las dos trayectorias. En el Capítulo 4 se mostrará este análisis aplicado a las zonas de estudio.

Dirección de la ladera (<i>Slope aspect</i>)	Pasadas ERS Ascendentes	Pasadas ERS Descendentes	Notas
Laderas mirando hacia el Este	Resolución de rango mejorada si $ \alpha < 67^\circ$	Foreshortening si $ \alpha < 23^\circ$	Sólo los datos ascendentes son adecuados para interferometría SAR y extracción de elementos por interpretación de imágenes.
	Shadow si $ \alpha > 67^\circ$	Layover si $ \alpha > 23^\circ$	Laderas pendiente $> 67^\circ$

Dirección de la ladera (<i>Slope aspect</i>)	Pasadas ERS Ascendentes	Pasadas ERS Descendentes	Notas
			no están cubiertas.
			Datos de deformación 1D en LOS.
Laderas mirando hacia el Oeste	Foreshortening si $ \alpha < 23^\circ$	Resolución de rango mejorada si $ \alpha < 67^\circ$	Sólo los datos descendentes son adecuados para interferometría SAR y extracción de elementos por interpretación de imágenes.
	Layover si $ \alpha > 23^\circ$	Shadow si $ \alpha > 67^\circ$	Laderas pendiente $> 67^\circ$ no están cubiertas.
			Datos de deformación 1D en LOS.
Laderas mirando hacia el Norte o el Sur	-	-	Baja sensibilidad del sistema por incompatibilidad con trayectoria (casi paralelas).

Tabla 4.4: Idoneidad de las imágenes SAR ERS 1/2 para el reconocimiento y estimación de movimientos del terreno, con respecto a la dirección (*slope aspect*) y pendiente de la ladera. (Considerando el ángulo de incidencia medio del rango cercano (*near range*) y lejano (*far range*)). (Modificada de Colesanti y Wasowski 2006).

En consecuencia, la influencia de la orientación y pendiente del terreno implica que la técnica DInSAR permita obtener resultados distintos dependiendo de la morfología regional en la que se emplace la zona de estudio.

En cuanto a los **Datos e Imágenes disponibles** necesarios para el estudio conviene comprobar la disponibilidad información adicional sobre la zona y los tipos de deformaciones a estudiar.

También es muy útil la disponibilidad de algún tipo de **análisis previo**: desde un inventario hasta una estimación con medios de topografía clásica o GPS de velocidades de movimientos de ladera o áreas subsidentes, estudios de tipo geológico o geomorfológico de la zona, datos históricos sobre deformaciones, daños, grietas, etc... Todo ello puede ayudar a centrar el análisis, acotarlo geográficamente e interpretar mejor los resultados. La selección de imágenes RADAR realizada para las zonas de estudio se expone en el Capítulo 5

Otras **características de las imágenes SAR** a utilizar en el estudio, como la trayectoria del sensor, frecuencia y fechas de la toma de imágenes, son fundamentales para poder determinar su viabilidad. Es necesario considerar las imágenes disponibles atendiendo a

la trayectoria del sensor, ascendente y descendente: número total de imágenes disponibles de cada trayectoria, fechas de toma, así como su distribución en el tiempo y las combinaciones posibles de imágenes para formar interferogramas, considerando el intervalo temporal que hay entre las imágenes que formarían cada interferograma, y las bases de los interferogramas. Los estudios se pueden realizar con una o dos trayectorias, en función de su adecuación a la orientación de las laderas si la topografía no es llana. Para cada trayectoria se genera un conjunto de interferogramas, que se trata de forma independiente.

Todo ello debe ser analizado en función del tipo de proceso de deformación del terreno que se aprecie en la zona de estudio.

Finalmente se deben considerar aspectos relacionados con la **Metodología DInSAR a emplear** para realizar el estudio. La empleada en este caso (Biescas et al, 2007) se podría considerar como una metodología DInSAR multi interferograma avanzada simplificada, ya que se considera una pila de interferogramas, y se obtiene una estimación media de velocidad para todo el periodo de tiempo considerado, pero no se realizan correcciones de posibles efectos atmosféricos, ni estimación de la componente no lineal de la deformación. Los aspectos a considerar están relacionados entre sí, y con otros ya explicados anteriormente, como la **necesidad de una serie de interferogramas** de la misma trayectoria. Al ser necesario un número alto de interferogramas, se requiere un número de imágenes tal que sus combinaciones generen un conjunto interferogramas (más de 30), con una distribución lo más uniforme posible dentro del periodo de estudio y con un intervalo temporal adecuado a la velocidad estimada del desplazamiento del terreno y con interferogramas de bases perpendiculares pequeñas, para minimizar la componente residual de la topografía (Berardino et al, 2002; Biescas et al, 2007). El hecho de que no incluya corrección de efectos atmosféricos limita la extensión espacial en la que puede aplicarse a unos pocos kilómetros, donde la componente atmosférica tiene una influencia despreciable. Esto simplifica considerablemente los procesos de cálculo de la metodología frente a otras (Biescas et al, 2007, Vallone et al, 2008).

El **uso de una pila de interferogramas** está condicionado por el objetivo de obtener datos cuantitativos del desplazamiento vertical partiendo del conocimiento previo de que existen zonas afectadas. Esto se corresponde con la Modalidad 2 de la metodología, que se comenta en el siguiente apartado.

4.1.2.-Selección de Imágenes

Una vez comprobada la viabilidad, entonces se ha de examinar la disponibilidad de IMÁGENES y realizar la selección correspondiente. Los factores a tener en cuenta para la selección de las imágenes se han detallado en el anterior apartado.

Es importante determinar cuál es el intervalo temporal que se requiere en el estudio. Esto condicionará la elección del satélite más adecuado (Tabla 4.5). Las imágenes de los satélites europeos, ERS 1-2 y ENVISAT_ASAR cubren un periodo bastante amplio. Los primeros desde 1992 y hasta el 2001². En el caso de las imágenes ENVISAT_ASAR, comenzaron a estar disponibles en 2002 y su cobertura temporal llega hasta la actualidad.

Satélite	Frecuencia [GHz]	Inicio misión	Fin misión	Longitud onda [cm]	Trabajos DInSAR basados en estos datos
SEASAT	1,275	1978	1978	23,5	Gabriel et al. (1989), Li and Goldstein (1990)
ERS-1	5,300	1991	2000	5,6	Massonnet et al. (1993), Goldstein et al. (1993)
ERS-2	5,300	1995	2005	5,6	Ferretti et al. (2000), Rosen et al. (2000)
JERS-1	1,275	1992	1998	23,5	Kimura and Yamaguchi (2000), Fujiwara et al. (1998)
RADARSAT-1	5,300	1995	-	5,6	Wegmüller et al. (2000a), Lu et al. (2003)
ENVISAT	5,331	2002	-	5,6	Wegmüller et al. (2000b), Arnaud et al. (2003), Monti Guarnieri et al. (2003)
RADARSAT-2	5,300	2007	-	5,6	Singhroy and Molch (2004b)
TerraSAR-X	9,650	2007	-	3,1	-
ALOS	1,275	2006	-	23,5	Sandwell et al (2008)

Tabla 4.5: Principales misiones SAR con capacidades interferométricas. En negrita los satélites europeos. (modificado de Crosetto et al, 2005)

Una vez seleccionado el satélite se ha de determinar la posición de la zona de interés para el estudio. En ERS 1-2 y ENVISAT, la zona de una ventana o “Frame” de imagen

² el satélite ERS 2 sigue en funcionamiento pero a partir de 2001 sufrió una alteración de su órbita lo cual es necesario tener en cuenta para la realización de estudios posteriores a esta fecha, ya que las correcciones de los parámetros orbitales no siempre serán conocidas y estarán disponibles

abarca 100 x 100 km. También hay que decidir si el estudio se realizará con imágenes de trayectoria descendente o ascendente, en función de las características de la zona y de la disponibilidad de imágenes idóneas. Se pueden utilizar ambas trayectorias, pero el tratamiento de las imágenes de cada trayectoria se hace separadamente y los resultados y estimación de movimiento se obtendrán de forma independiente para cada paquete de imágenes. (Figura 4.4)

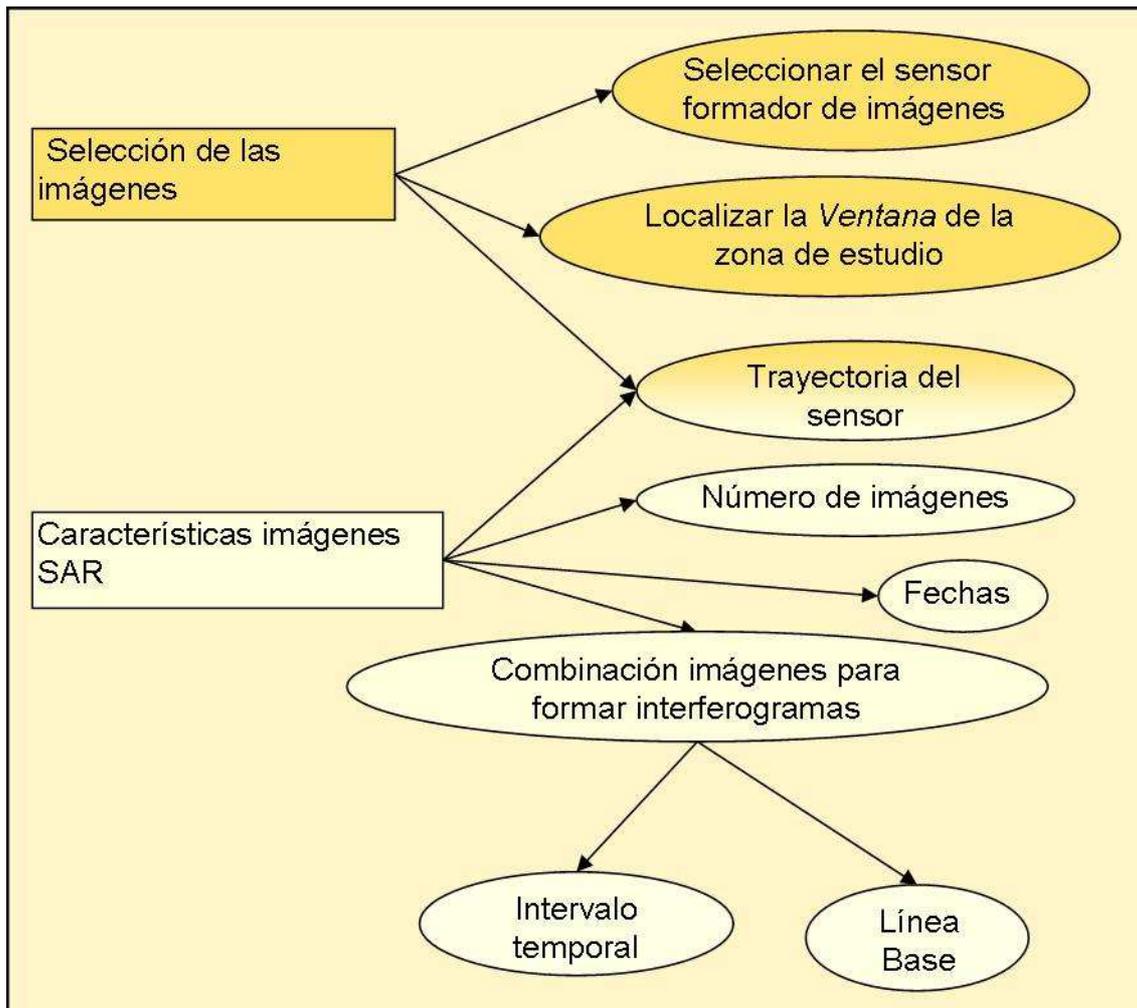


Figura 4.4: aspectos de la metodología y criterios PRE DInSAR relacionados con la selección de imágenes.

4.2.- DInSAR

La aplicación de la técnica DInSAR permite dos niveles de estudio complementarios (Crosetto et al, 2005). Es lo que se denomina la metodología de doble modalidad:

1.-La detección de procesos desconocidos previamente sobre áreas extensas, donde la técnica se usa como una herramienta de detección temprana de deformaciones.

Para ello se pueden emplear un número más limitado de imágenes, para abaratar el coste y el tiempo de procesado. Es indicada para zonas extensas en las que se conozca, a priori, la existencia de condiciones que mantengan la coherencia en el periodo analizado y donde no haya grandes dificultades por los efectos geométricos que induce el relieve en las imágenes. Todo ello conduce a seleccionar zonas con una cobertura urbana, suburbana o industrial suficientemente continua y topografía bastante llana.

2.-Análisis cuantitativo de procesos de deformación previamente conocidos. Puede aplicarse directamente sobre deformaciones previamente conocidas, o localmente, en zonas donde se haya detectado deformaciones a partir del estudio con DInSAR en áreas extensas. Este tipo de análisis requiere redundancia de datos, es decir el uso de gran cantidad de imágenes SAR de la zona de deformaciones a analizar. La redundancia de imágenes representa un factor clave para conseguir estimaciones cuantitativas de la deformación con la necesaria precisión.

El proceso DInSAR se desarrolla en 3 fases principales (Fernandez et al. 2009):

1. Fase General. Incluye las elaboraciones básicas, que parten de las imágenes *Single Look Complex*³ SLC para llegar al cálculo de los interferogramas diferenciales con la fase enrollada.
2. Fase Específica. Comprende las elaboraciones específicas de DInSAR desde la selección de los interferogramas enrollados hasta la interpretación de los resultados.
3. Fase de integración de resultados. Los resultados obtenidos se integran en el Sistema de información geográfica SIG.

La metodología utilizada en esta etapa para este estudio se sintetiza en el esquema de la Figura 4.5.

³ Imágenes *Single Look Complex* (SLC): producto obtenido a partir de las imágenes *RAW data* mediante un proceso de focalización del que se obtienen imágenes de alta resolución. El proceso de focalización consiste en una compresión en ambas dimensiones (*range* y *azimuth*) y una operación de filtrado para incrementar la resolución de las imágenes.

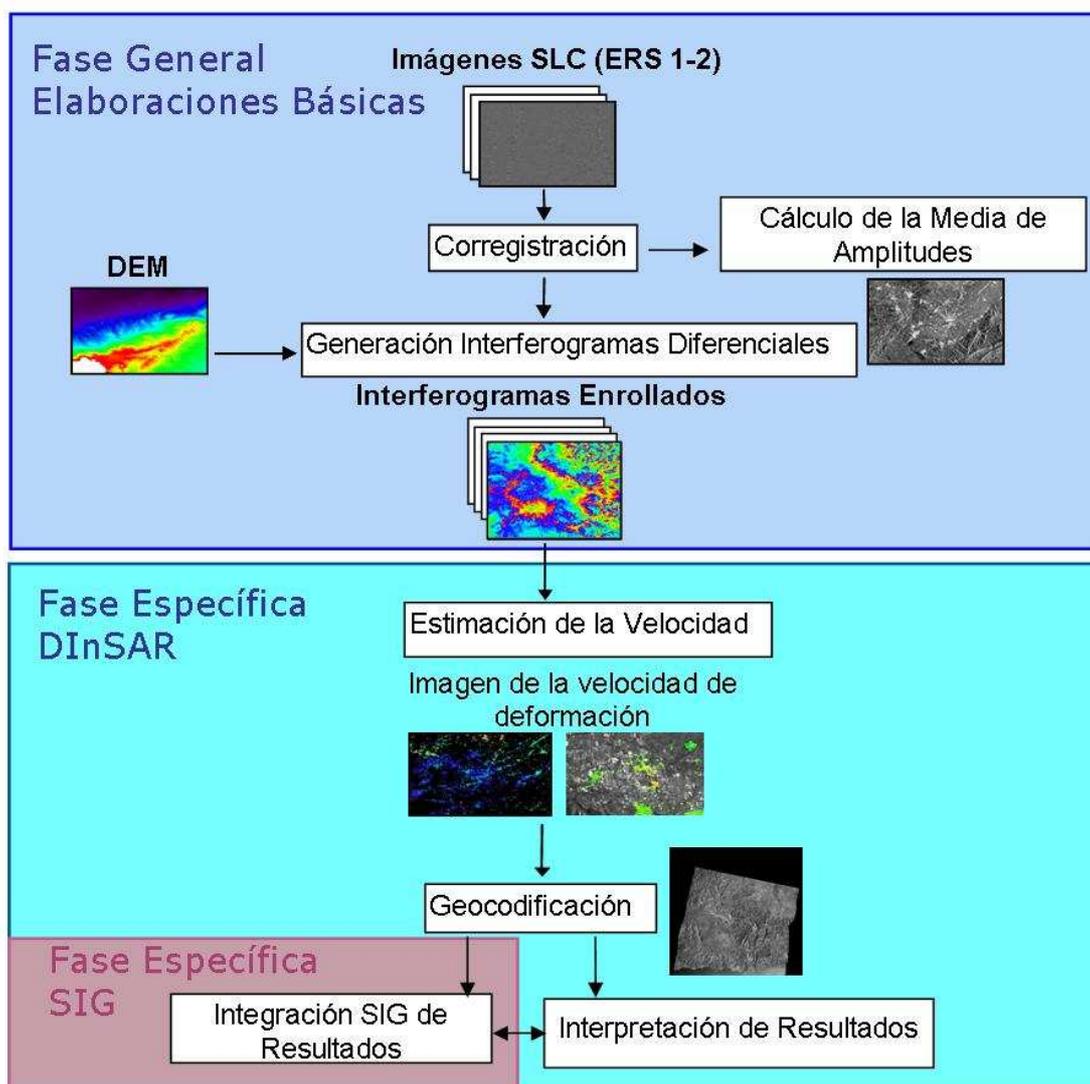


Figura 4.5: Esquema de la metodología DInSAR. Modificado de Fernandez et al, 2009.

4.2.1.-Fase General: elaboraciones básicas

La Fase General incluye todas las elaboraciones básicas. Es decir que comprende todas las elaboraciones que son necesarias para cualquier análisis DInSAR en cualquier tipo de aplicación, por lo que podemos decir que esta fase puede ser común a otras metodologías. El esquema de la fase general se muestra en la Figura 4.6.

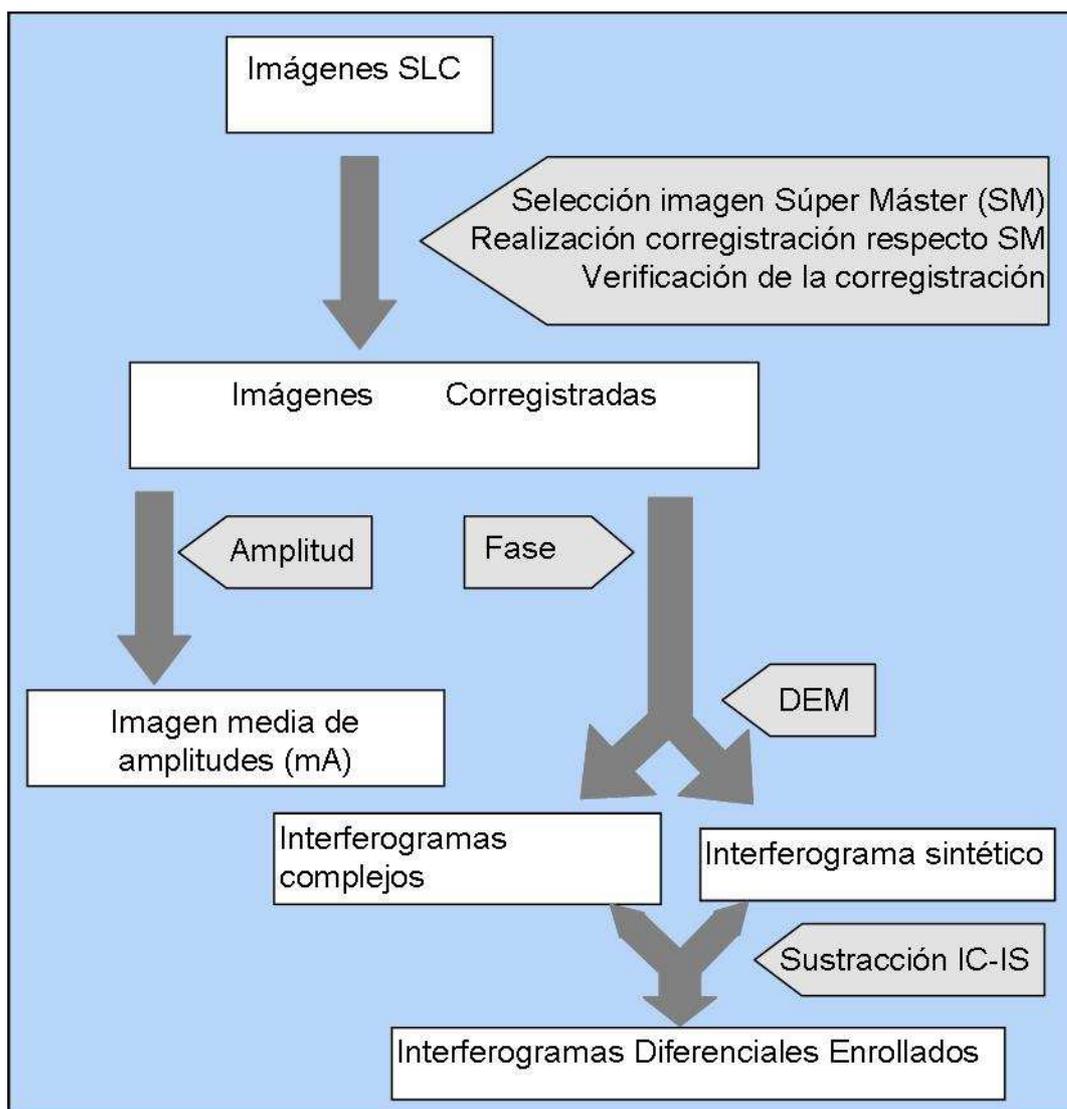


Figura 4.6: esquema de la fase general de la metodología DInSAR

En esta fase se parte de las imágenes SLC para la realización de la corrección, proceso que consiste en disponer todas las imágenes en la misma geometría, para lo cual se ha de elegir una imagen de referencia a la cual se referirán las restantes (Rosen et al, 2000). Esta imagen se denomina “Supermáster” y habitualmente suele ser la más antigua.

Una vez se obtienen las imágenes corregistradas, se calcula la imagen de la media de amplitudes de todas ellas.

Con las imágenes corregistradas y el DEM se obtienen los interferogramas diferenciales. La obtención de dichos interferogramas se realiza en dos partes. La primera de ellas consiste en la realización del interferograma complejo a partir de dos imágenes corregistradas, (maestra y esclava, master y slave) como se indicó en la

sección 2.2.1. La segunda parte consiste en la simulación de un interferograma sintético a partir del DEM, como ya se explicó en la sección 2.2.1. Finalmente este interferograma simulado se sustrae a los interferogramas complejos obteniéndose los interferogramas diferenciales enrollados.

4.2.2.- Fase Específica: estimación de la velocidad de deformación

La **Fase Específica** comienza con la selección de los interferogramas diferenciales para calcular la imagen de velocidad de la deformación, expresada en mm/año para el intervalo temporal considerado. Esta parte del análisis ha sido realizada en colaboración con la Unidad de Teledetección Activa (UTA) del Instituto de Geomática de la Universidad Politécnica de Cataluña, con sede en Castelldefels (Barcelona), empleando un nuevo software no comercial desarrollado por dicha unidad. Las características de los algoritmos utilizados se encuentran en Biescas et al. (2007). El esquema de la Fase Específica DInSAR se muestra en la Figura 4.7.

La imagen de velocidad se puede superponer a la imagen del promedio de la amplitud, obteniendo así una imagen general en la que se puede localizar rápidamente, aunque de forma aproximada, la zona de deformación del terreno, tomando como referencia la velocidad de desplazamiento estimada en la zona de estudio.

Realizando la geocodificación de la imagen de velocidad y superponiendo esta imagen en mapas u ortofotos, se obtiene una localización precisa de las zonas de deformación del terreno y las velocidades correspondientes.

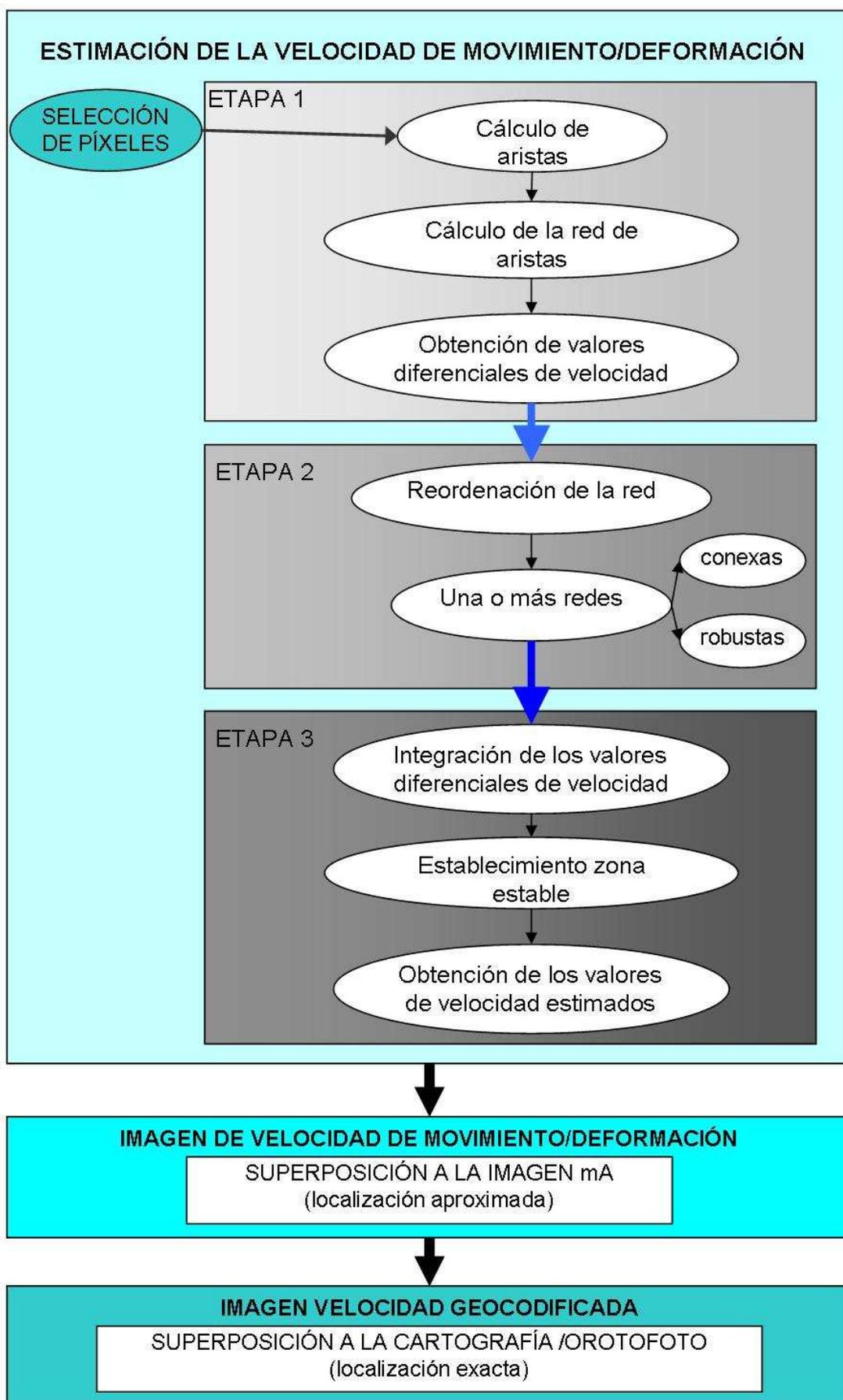


Figura 4.7: esquema de la Fase Específica DInSAR

El software IDEG en la Fase Específica: la obtención de la velocidad de deformación (Biescas et al. 2007)

Este software ha sido desarrollado por la Unidad de Teledetección Activa del Instituto de Geomática de Barcelona. Sus fases y funcionamiento interno, que se exponen a continuación, se encuentran recogidos en Biescas et al. (2007)

El funcionamiento interno de este software consta de varias etapas en las que, a partir de unos píxeles de los interferogramas que cumplen una serie de condiciones, se obtienen valores de velocidad en milímetros/año en la dirección de visión del sensor (LOS). Sus rasgos fundamentales son:

1) Trabaja con múltiples observaciones interferométricas: su principal entrada es una pila de N interferogramas enrollados.

2) Utiliza un modelo que permite la estimación conjunta de la deformación del terreno y del error topográfico a partir de las fases interferométricas enrolladas, de forma que evita la problemática etapa del desenrollado de la fase.

Estos rasgos se desarrollan en las siguientes etapas: 1.Cálculo de aristas y su red; 2.Reordenación y 3.Integración:

1.- Cálculo de aristas y su red

Esta etapa se inicia con la selección por el investigador de un conjunto de píxeles de los interferogramas correspondientes a la zona de interés. Esta selección, se introduce en el programa en forma de imagen máscara, (con valor 0 en los píxeles seleccionados y valor 1 en el resto). A partir de estos píxeles se calculan aristas y se establece una red cumpliendo una serie de condiciones.

Para cada arista se calcula una diferencia de fase a partir de la diferencia de fases de los dos píxeles correspondientes a sus extremos. Para ello se tiene en cuenta el valor de la diferencia de fase entre los píxeles en todo el conjunto de interferogramas considerado. Con esta diferencia de fase, teniendo en cuenta la ecuación elemental DInSAR, se estima el diferencial de velocidad de la deformación del terreno y el error topográfico para cada arista. (Figura 7.8).

Para que las aristas pasen a la siguiente fase del cálculo han de cumplir una serie de condiciones:

- a) En sí mismas: valor de la función γ y por encima de un umbral.
- b) Dentro de la red generada a partir de estas aristas. Esta red se forma mediante triangulación de Delaunay.

Para la realización de dicha triangulación es necesario establecer una serie de valores a unos parámetros, por encima de los cuales la arista en cuestión no sigue adelante en el proceso. Entre estos valores están:

- La longitud de la arista, que no debe ser muy grande para evitar que haya efectos atmosféricos que afecten al valor de la fase de los puntos que la forman.
- Valor de la función γ de la arista. Su valor está comprendido entre 0 y 1 siendo 1 el valor mejor (ver explicación en sección siguiente). Se introduce un valor de umbral próximo a 1.
- Valores de tolerancia para la velocidad y error topográfico. Éstos indicarán los valores por encima de los cuales se rechaza la arista en el cálculo de los valores de velocidad y del error topográfico, dentro del circuito planteado al realizarse la triangulación (Figura 4.8).

Para que cada píxel siga adelante en el cálculo de la velocidad de deformación, debe cumplir una condición más: estar o formar parte de un número de aristas, definido previamente por el usuario, que hayan superado todas las restricciones y condiciones puestas durante el proceso. Con ello, finalmente, se garantiza que los valores de velocidad y error topográfico en cada píxel se calculan con redundancia y no a partir de un valor único, lo que contribuye a mejorar la estimación.

Además se establecen:

- el número máximo de aristas que se formarán a partir de un punto
- el número máximo de aristas que se aceptarán en un punto (redundancia)

El valor de la fase diferencial enrollada sobre cada arista se calcula restando los valores de la fase enrollada de sus extremos. Cada arista tiene un valor de diferencia de fase para cada uno de los N interferogramas. (Biescas et al, 2007)

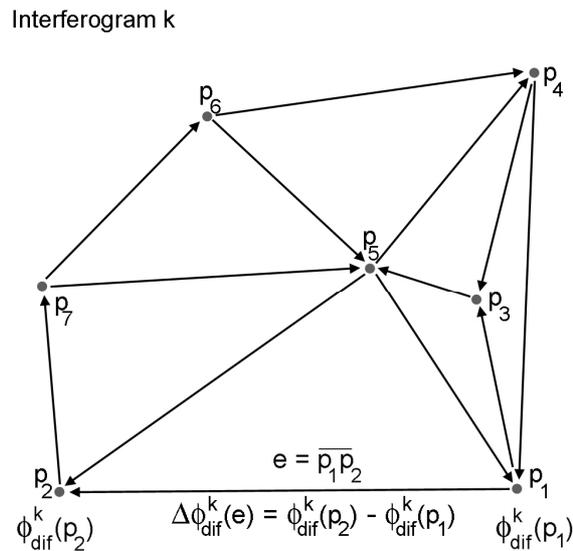


Figura 4.8: Conexión de los píxeles. Los píxeles seleccionados están conectados por aristas. El valor de la fase diferencial enrollada sobre cada arista se calcula restando los valores de la fase enrollada de sus extremos. Cada arista tiene un valor de diferencia de fase para cada uno de los N interferogramas. (Biescas et al. 2007)

2.- Reordenación

Una vez que tenemos nuestro conjunto de aristas, las cuales forman una red, se pasa a la fase de **reordenación**. Esta fase consiste en la eliminación de aristas repetidas y el establecimiento de redes de aristas robustas y conexas, lo que garantizará una buena estimación de los valores de velocidad y error topográfico de los puntos. Esta reordenación puede dar lugar a una o varias redes de píxeles, las cuales se han de integrar separadamente.

3.-Integración

El último paso para la estimación de velocidades en los píxeles es la **integración**. A partir de ella se pasa de valores diferenciales de velocidad y error topográfico a valores estimados de velocidad y error topográfico. Para ello es necesario el establecimiento de una zona estable o de referencia que comprenda uno o varios de los píxeles incluidos en la red de aristas generada, tanto para el valor de velocidad como para el valor del error topográfico. Con ello se establece un sistema de ecuaciones para cada red, con las aristas y triángulos que la forman, y con las zonas de referencia para la velocidad y el error topográfico definidas. La resolución del sistema se realiza mediante un ajuste de mínimos cuadrados, considerando la velocidad lineal y el error topográfico sobre cada píxel como incógnitas y las velocidades y error diferencial estimados como

observaciones. Los valores resultantes serán valores referidos a las zonas de referencia definidas para la velocidad y el error topográfico. Un aspecto a tener en cuenta es que cuanto mayor es el cociente entre aristas y píxeles, más fiables son los resultados de la integración.

La Función Gamma γ

La función γ relaciona el valor observado o medido en los interferogramas de la diferencia de fase con un valor de diferencia de fase modelizada, que depende del diferencial de velocidad y del diferencial de error topográfico:

$$\gamma(e) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \exp(j \cdot (\Delta\phi_{obs}^k(e) - \Delta\phi_m^k(\Delta v(e), \Delta te(e))))$$

Donde N es el número de interferogramas, Mora et al. (2003).

Para encontrar los valores del diferencial de velocidad y del diferencial de error topográfico será necesario maximizar dicha función. En esta metodología, la maximización se realiza numéricamente, considerando un intervalo para cada uno de los diferenciales, es decir un intervalo para el diferencial de velocidad y otro para el diferencial de error topográfico. Además, se establece una frecuencia de paso dentro de cada uno de los intervalos, para ir incrementando los valores que se chequean dentro de cada uno de los dos intervalos. Esta solución no da exactamente el máximo absoluto γ_{max} pero sí la mejor aproximación $\overline{\gamma_{max}}$ debido al uso de una red discontinua. Cuanto más densa es la red discontinua mejor será la aproximación, pero al mismo tiempo, se necesitará mayor tiempo de computación y cálculo

Estimación del diferencial de la velocidad y el error topográfico diferencial.

Estos valores diferenciales se calculan sobre cada arista usando las N fases diferenciales enrolladas y parámetros geométricos de cada interferograma. Para obtener de cada arista e el diferencial de velocidad $\Delta v(e)$ y el diferencial del error topográfico $\Delta te(e)$ hay que encontrar los valores que minimicen la función:

$$\Delta\epsilon^k(e) = \Delta\phi_{obs}^k(e) - \Delta\phi_m^k(\Delta v(e), \Delta te(e)) \quad (\text{mod } 2\pi) \quad (1)$$

Donde $\Delta\phi_{obs}^k(e)$ es el diferencial de la fase enrollada de la arista e_i en el interferograma k , y

$$\Delta\phi_m^k(\Delta v(e), \Delta te(e)) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta T^k \Delta v(e) + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}^k}{R^k \sin\theta^k} \Delta te(e) \quad (2)$$

Es la fase diferencial modelizada, donde $\Delta v(e)$ y $\Delta te(e)$ son las incógnitas asociadas a la arista e ; ΔT^k , B_{\perp}^k son el incremento temporal y la base perpendicular del interferograma k ; R^k y θ^k son el rango de inclinación (*margen del ángulo de visión slant range*) medio y el ángulo de incidencia medio del interferograma k ; y λ es la longitud de onda radar. Es importante destacar que en la ecuación (2) se ha considerado un modelo de deformación lineal del terreno. Para encontrar las incógnitas $\Delta v(e)$ y $\Delta te(e)$ se maximiza la siguiente función:

$$\gamma(e) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \exp(j \cdot (\Delta\phi_{obs}^k(e) - \Delta\phi_m^k(\Delta v(e), \Delta te(e)))) \quad (3)$$

Donde N es el número de interferogramas, Mora et al. (2003). En esta investigación la maximización de la función (3) se hace numéricamente. Para encontrar los valores $\overline{\Delta v}(e)$ y $\overline{\Delta te}(e)$ que dan el máximo $\gamma(e)$, se usa una cuadrícula discontinua (Figura 4.9).

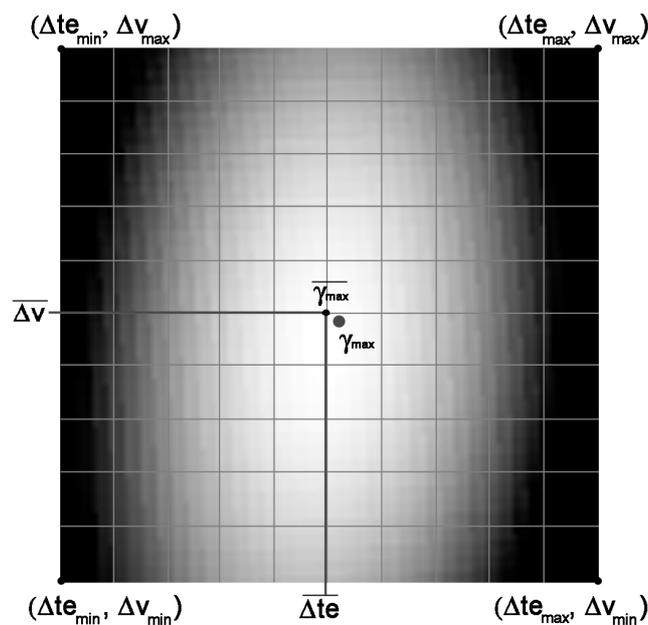


Figura 4.9: Estimación del diferencial de velocidad y del diferencial del error topográfico. Biescas et al. 2007.

Para cada arista este valor de la función se usa para evaluar la bondad del ajuste del modelo con el conjunto dado de fases enrolladas (observaciones)

4.3.-POST DInSAR

Una vez obtenidos los resultados del proceso DInSAR, una imagen de velocidad de deformación en la dirección LOS geocodificada, se realiza su análisis e interpretación. Esta fase se realiza integrando los resultados con otras informaciones y analizándolas en un sistema de información geográfica (SIG). Para poder integrar los resultados obtenidos con otras informaciones, es necesario transformar la imagen resultante en un formato de datos compatible que pueda ser gestionado por el SIG utilizado. (Figura 4.10).

La disponibilidad de informaciones sobre los elementos del territorio que puedan estar relacionados con el proceso de deformación del terreno condiciona el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos. Es, además, fundamental disponer de una cartografía de base para la localización y contextualización de la zona, como primer paso del estudio de los factores relacionados con el proceso de deformación cuantificado.

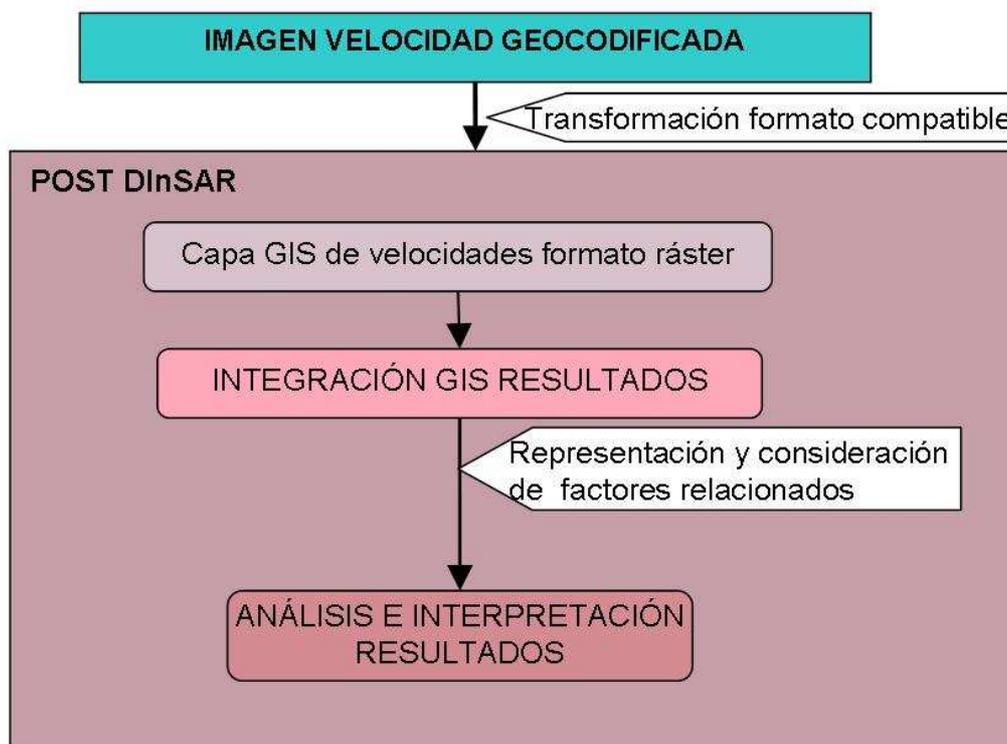


Figura 4.10: esquema de la fase POST DInSAR de la metodología.

5.-FASE EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta la aplicación de la metodología a los datos e imágenes propios de la investigación. Las referencias y descripciones teóricas para cada uno de los pasos se encuentran recogidas en el Capítulo 4.

En este sentido, en el caso de la aplicación de la fase específica DInSAR, la metodología se aborda en dos modalidades diferenciadas que se relacionan con diferentes objetivos:

- En primer lugar se emprende el estudio de zonas sobre las que no existe información previa, preferentemente zonas de topografía llana y de tejido urbano desarrollado, en las que la metodología específica se aplica como herramienta para la detección de zonas con desplazamientos verticales activos. La metodología se ha usado con esta modalidad en los casos de Granada y su área metropolitana. Como se expone en el Capítulo 4 sobre metodología, la identificación y cuantificación de deformaciones verticales en zonas con estas características permite el empleo extensivo de la técnica. Por otra parte al ser esta la primera ocasión en que se emplea DInSAR en Andalucía a pesar de que no se dispone de ningún dato previo indicativo de fenómenos de subsidencia en la Depresión de Granada, se delimitó la zona indicada en la Figura 5.2. Los resultados obtenidos, que se presentan en el Capítulo 6 se remiten a esta zona.
- La segunda modalidad se centra en la cuantificación de movimientos de ladera previamente identificados y sobre los que se trata de establecer el grado de actividad. En este caso el ámbito geográfico a estudiar está muy acotado y en función de las informaciones adicionales que se posean y sus características, se puede realizar un estudio centrado en la zona afectada por el movimiento de ladera. En concreto se ha aplicado al estudio de los movimientos de ladera inventariados en la cuenca del Río Guadalfeo al Sur de la provincia de Granada por el Grupo RNM 121 (PAI; Junta de Andalucía), en las zonas indicadas en la Figura 5.2. Para este tipo de estudio es imprescindible una cantidad de datos redundantes, ya que se emplea una serie de interferogramas de un mismo sensor y de igual trayectoria, para abarcar un periodo amplio de estudio.

Para la investigación en la primera modalidad, como se ha indicado, no se disponía de información previa, por lo que no se realizó el análisis Pre-DInSAR referente a la

viabilidad del estudio, pasándose directamente a la selección de imágenes, que en este caso engloban alas zonas de estudio de ambas modalidades. La segunda modalidad se realizó conforme a los datos y características de la zona de estudio del Río Guadalfeo, que se conocía previamente y desde un principio era el objetivo de la investigación. La Figura 5.1 muestra un esquema de la aplicación de la metodología para los casos de estudio.

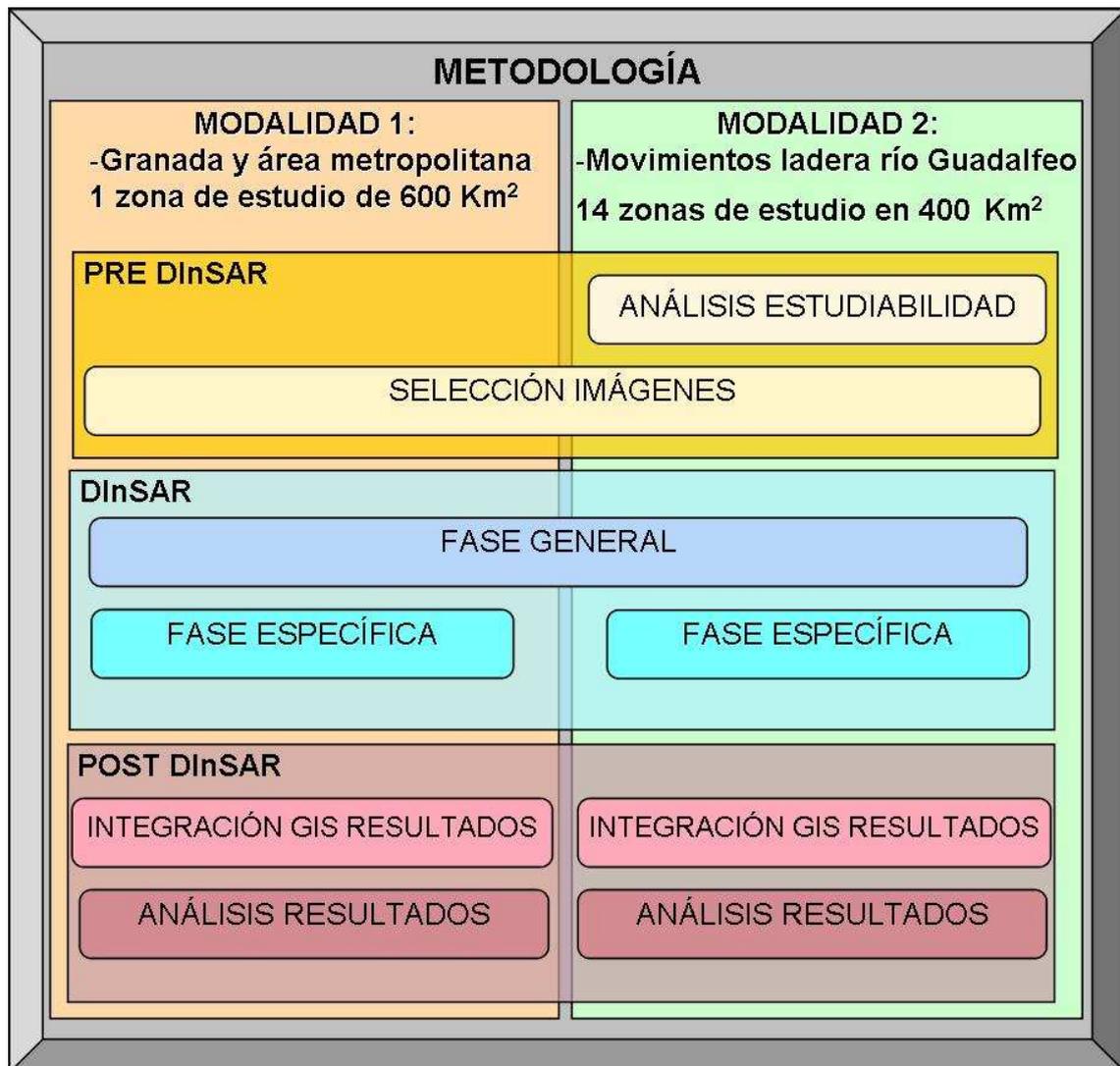


Figura 5.1: Esquema de la metodología DInSAR diferenciando la aplicación a zonas de la modalidad 1 y modalidad 2.

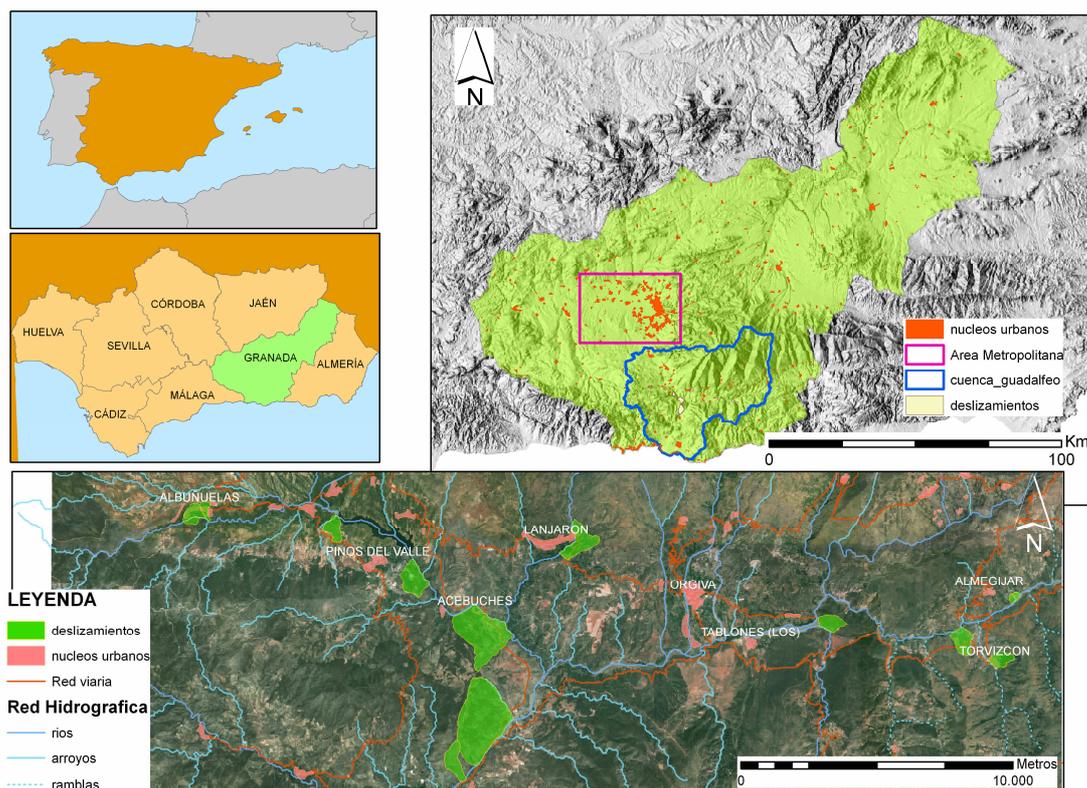


Figura 5.2: Localización de las zonas de estudio. En la parte inferior los deslizamientos preseleccionados

5.1.-PRE DInSAR

Se expone en primer lugar la fase de la selección de imágenes ya que es común a las modalidades 1 y 2.

5.1.1.-Selección de imágenes:

La selección de las imágenes de la zona de interés, que comprende la zona Sur de la provincia de Granada hasta la costa, se realizó abarcando el rango de fechas más amplio posible. Al comienzo de la investigación, en 2004, la disponibilidad de imágenes de los satélites ERS1 y ERS2 se extendía entre 1993 y 2000⁴ y sin embargo del ENVISAT se disponía sólo desde 2002 por lo que, se optó por realizar el estudio con las imágenes ERS. Además el hecho de estudiar los desplazamientos del terreno en este intervalo temporal posibilitaba considerar un periodo importante para los movimientos de ladera como fue el año hidrológico 1996-1997, muy lluvioso en el que la actividad de los

⁴ Existen imágenes ERS2 posteriores al año 2000, pero un fallo en los giroscopios, que se utilizan para estabilizar el satélite y conocer su posición, en febrero de 2001 hizo que dejaran de funcionar, lo cual desaconseja su uso en fechas posteriores.

movimientos de ladera fue intensa lo que podría registrarse en los desplazamientos medidos con DInSAR.

Dentro del conjunto de imágenes ERS1 y 2 del periodo escogido, 1993-2000, se realizó una selección conforme a los siguientes criterios:

1. Distribución temporal lo más homogénea posible.
2. Valor máximo de las líneas base que forman las imágenes de 1000m.
3. Selección de la trayectoria del sensor y de la traza (*track*) y ventana (*frame*): de forma que se cubriese la zona de interés considerando que hubiese el mayor número de imágenes posibles. En base a estas características y según la disponibilidad de imágenes se decidió empezar con un paquete de imágenes capturadas en la trayectoria del sensor descendente. Posteriormente se procesó otro conjunto de imágenes ascendentes.

Fase A: Selección de un conjunto de imágenes descendentes.

Fase B: Selección imágenes ascendentes.

Fase A: Selección de un conjunto de imágenes descendentes.

Se decidió primeramente realizar el estudio con imágenes de trayectoria descendente, *traza*280, *ventana* 2860 (Figura 5.3).

Se escogieron todas las imágenes disponibles: 25 imágenes, comprendidas entre 02/12/1993 y 24/12/2000. En la tabla 5.1 se recoge el listado de las imágenes adquiridas.

Satélite	Fecha	Órbita	Satélite	Fecha	Órbita
ERS1	19931202	12449	ERS2	19980208	14663
ERS1	19950603	20308	ERS2	19980419	15665
ERS1	19950812	21310	ERS2	19980906	17669
ERS2	19950813	1637	ERS2	19990404	20675
ERS1	19951021	22312	ERS1	19990717	41851
ERS2	19951022	2639	ERS1	19991030	43354
ERS2	19951231	3641	ERS2	19991031	23681
ERS1	19960518	25318	ERS2	20000109	24683
ERS2	19960519	5645	ERS2	20000528	26687
ERS2	19961215	8651	ERS2	20000806	27689
ERS2	19970330	10154	ERS2	20001015	28691
ERS2	19970504	10655	ERS2	20001224	29693
ERS2	19970713	11657			

Tabla 5.1: listado de imágenes de trayectoria descendente adquiridas

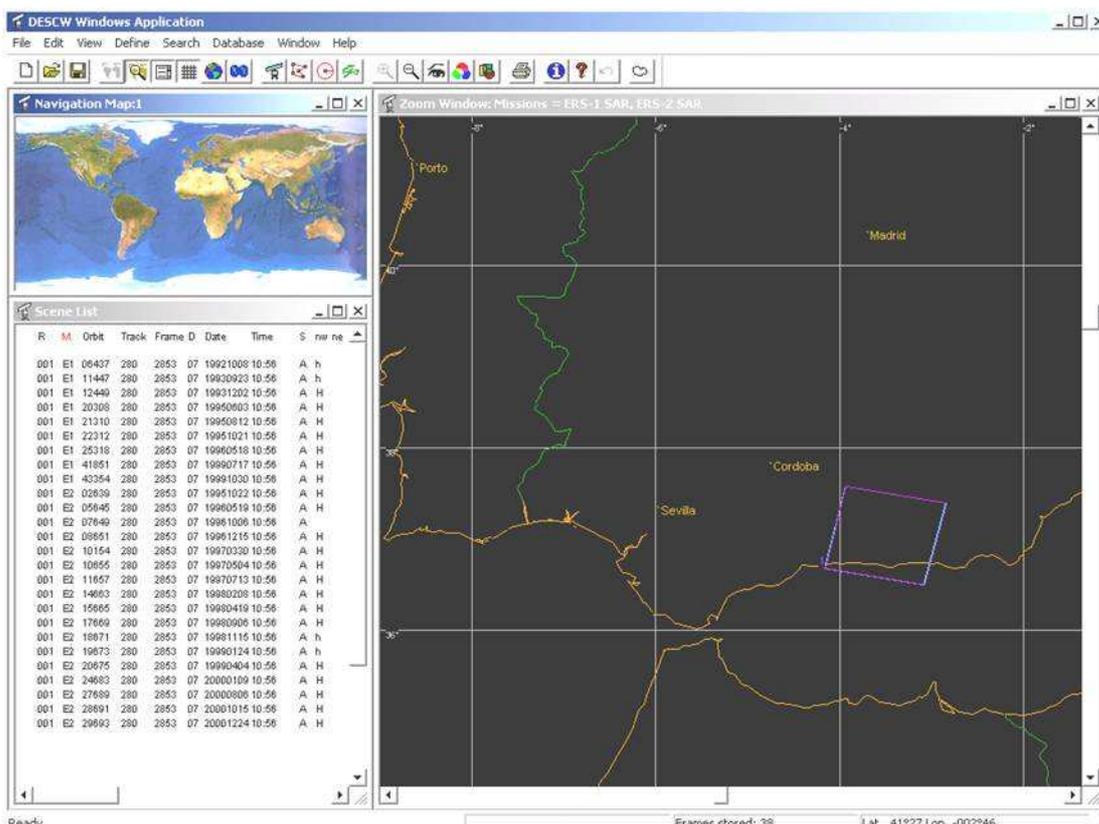


Figura 5.3: Ventana del programa descw usado para realizar la búsqueda y selección de la imágenes. A la derecha mapa de la ventana de datos seleccionada de trayectoria descendente: 280_2860 y a la izquierda el listado de imágenes seleccionadas.

Fase B: Selección imágenes ascendentes.

Una vez realizado todo el proceso, hasta la obtención de resultados con el bloque de imágenes descendentes, se realizó una nueva selección de imágenes de la misma zona y el mismo intervalo temporal, esta vez de trayectoria ascendente, que completasen los resultados obtenidos con el grupo de imágenes descendentes. Los criterios de selección fueron los mismos que en las imágenes descendentes. Se realizó la adquisición de 15 imágenes del rango de fechas más amplio posible (desde 03/06/1993 a 21/05/2000) de los satélites ERS1 y ERS2. Las imágenes son de la *traza* 187 y *ventana*: 735. (Figura. 5.4). En la tabla 5.2 se recoge el listado de las imágenes adquiridas.

Satélite	Fecha	Órbita
ERS 1	19930603	9851
ERS 1	19930708	10352
ERS 1	19930916	11354
ERS 1	19950701	20716
ERS 2	19950806	1544
ERS 1	19951118	22720
ERS 2	19951119	3047
ERS 1	19960406	24724

Satélite	Fecha	Órbita
ERS 2	19970601	11063
ERS 2	19970810	12065
ERS 2	19971019	13067
ERS 2	19980412	15572
ERS 2	19990606	21584
ERS 2	20000312	25592
ERS 2	20000521	26594

Tabla 5.2: listado de imágenes de trayectoria ascendente adquiridas

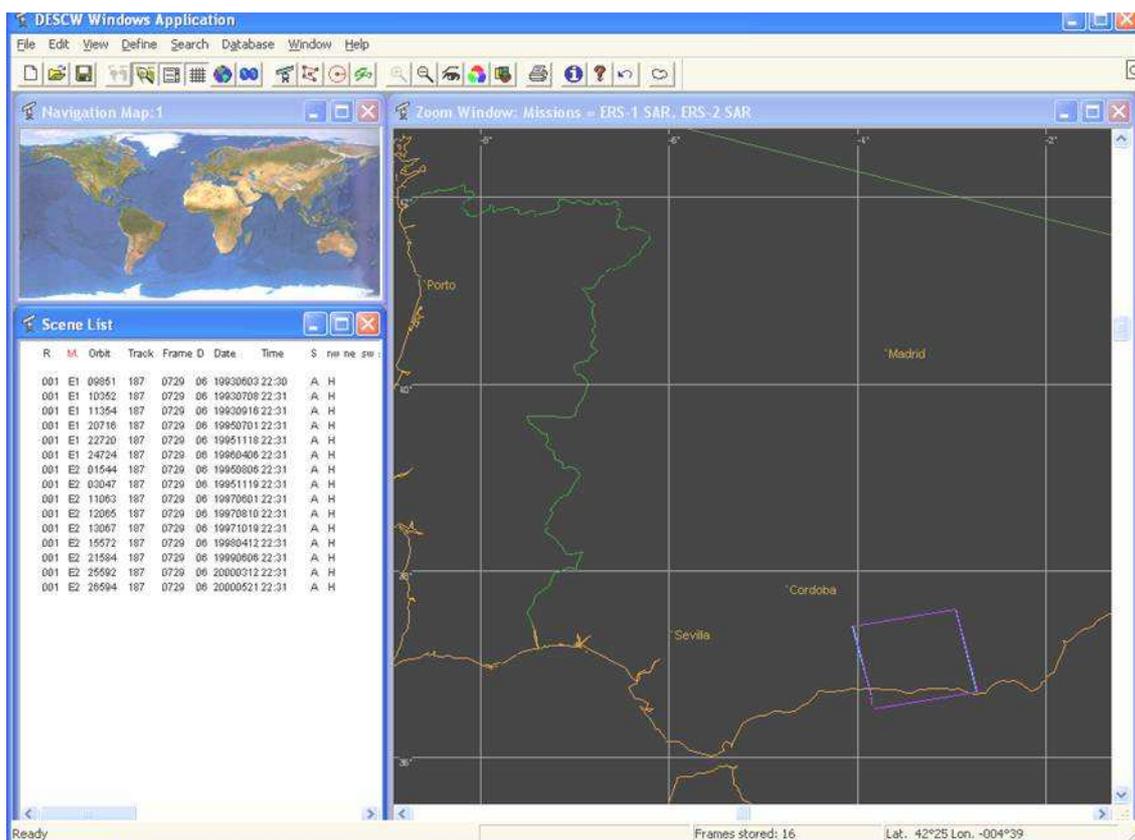


Figura 5.4: Ventana del programa descw usado para realizar la búsqueda y selección de las imágenes. A la derecha mapa de la ventana de datos seleccionada de trayectoria ascendente: 187_0735 y a la izquierda el listado de imágenes seleccionadas.

Las imágenes seleccionadas se adquirieron en el marco del proyecto Cat1-1382 de la Agencia Espacial Europea (ESA).

5.1.2.-Viabilidad del estudio de los movimientos de ladera

La aplicación de la técnica DInSAR se estableció para una preselección de 14 zonas con movimientos de ladera de la cuenca (Figura 5.2) sobre los cuales se planteaban dudas respecto al grado de actividad real. Todos estos movimientos se clasifican como deslizamientos (Cruden y Varnes, 1996), y en su mayoría traslacionales, salvo el de Albuñuelas que se consideraba como un deslizamiento rotacional, aunque en este caso los resultados DInSAR han permitido descartar esta hipótesis, como se expondrá en el Capítulo 6. Esta preselección se hizo en base a distintas características de los movimientos de ladera:

- Dimensiones (suficientemente grandes)

- Importancia económica social (afectan a asentamientos humanos o infraestructuras).
- Actividad (deslizamientos activos dormidos, algunos de los cuales se reactivaron con las lluvias del otoño de 1996).
- Zonas no excesivamente cubiertas por vegetación
- Zonas preferentemente en materiales rocosos, o con estructuras y edificaciones.

No se consideraron aspectos relacionados con la orientación y pendiente de los enclaves.

Una vez realizada la preselección se analizó la orientación y pendiente de los terrenos de cada una de las zonas para determinar cuáles eran objetivamente viables. Para ello se utilizó el DEM disponible de la zona a partir del cual se realizaron los siguientes productos derivados usando las herramientas de los programas ArcGIS y ENVI

- Mapa de orientaciones de la zona (Figura 5.5)
- Mapa de pendientes de la zona (figura 5.6).

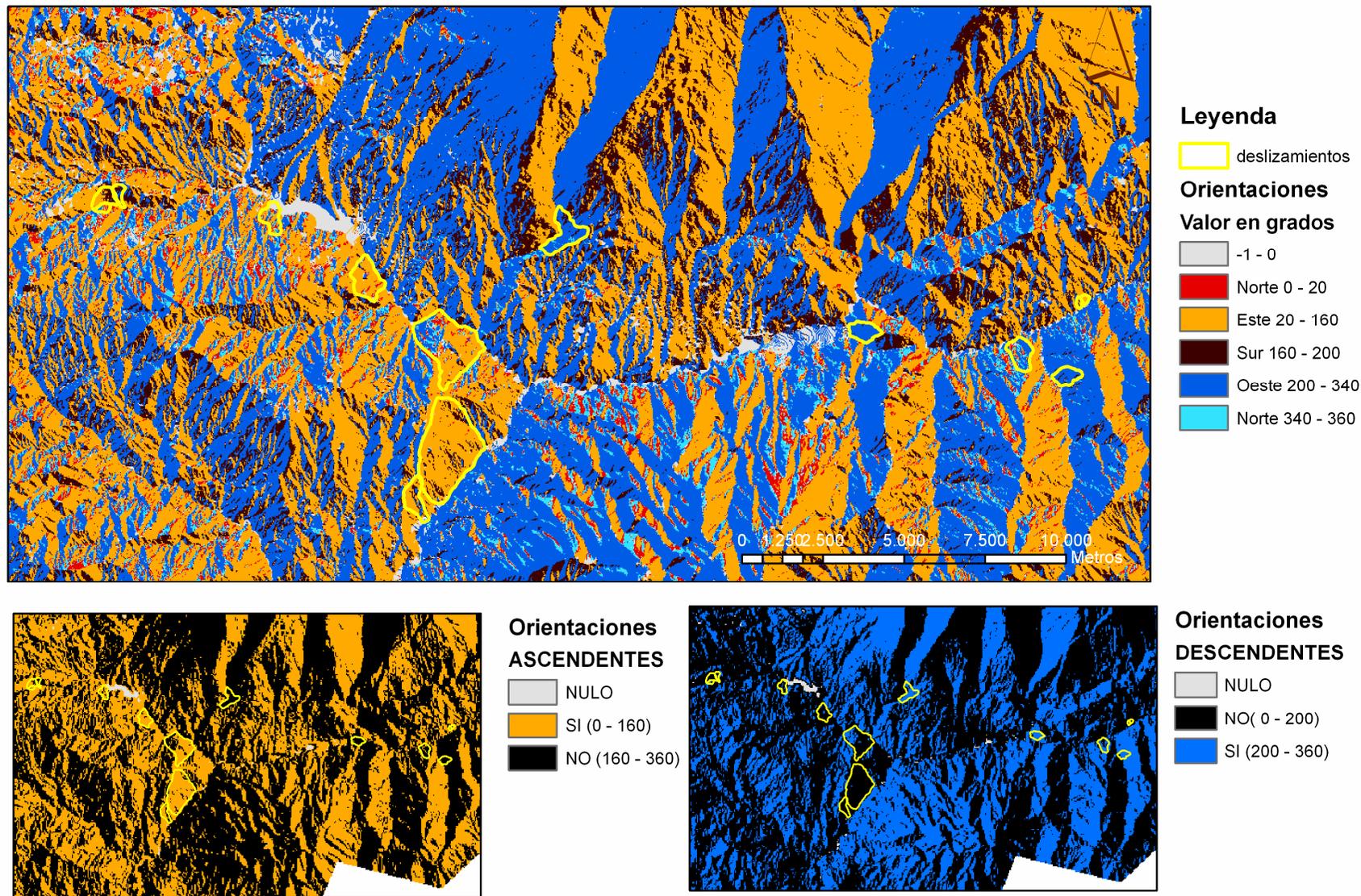
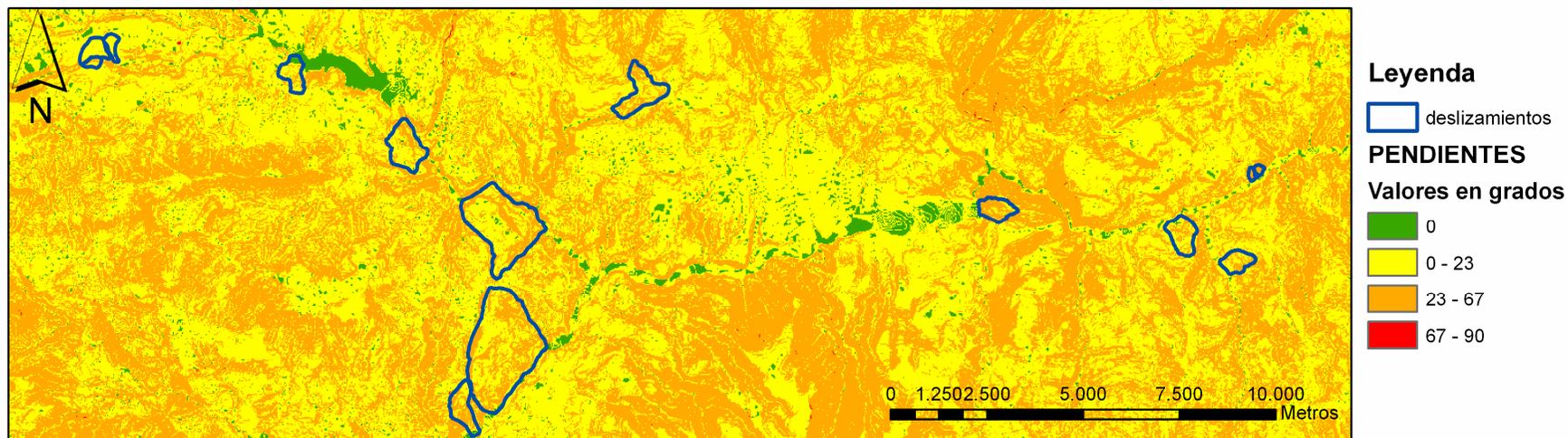


Figura. 5.5: Mapas de orientaciones de las laderas con superposición del perímetro de los movimientos de ladera. El superior indica las orientaciones clasificadas. Los dos inferiores: izquierda orientaciones viables (en naranja: 0-160°) e inviables (negro); derecha zonas viables con imágenes descendentes (azul: 200-360°) y no viables (negro).



Leyenda

deslizamientos

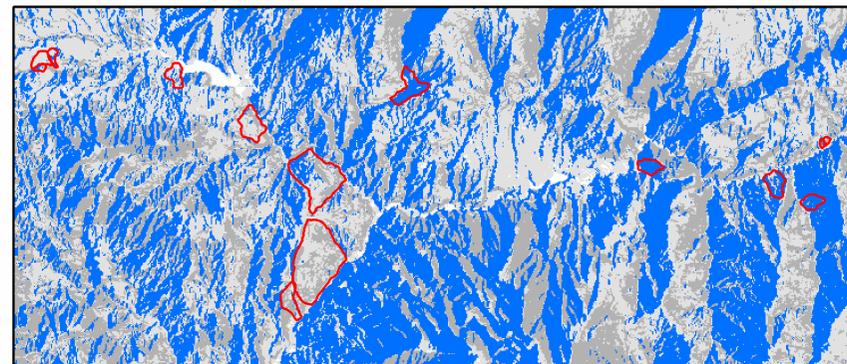
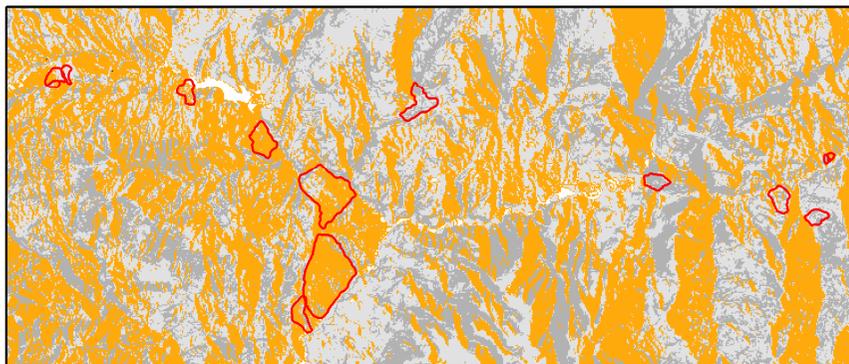
PENDIENTES

Valores en grados

- 0
- 0 - 23
- 23 - 67
- 67 - 90

ASCENDENTES

DESCENDENTES



Orientaciones Estudiables PENDIENTES

NULO	0 - 23 acortamiento foreshortening
SI (0 - 160)	23 - 67 inversion layover
NO (160 - 360)	67 - 90 sombra shadow

Orientaciones Estudiables PENDIENTES

NULO	0 - 23 acortamiento foreshortening
NO (0 - 200)	23 - 67 inversion layover
SI (200 - 360)	67 - 90 sombra shadow

Figura 5.6: Pendientes de la zona de estudio. En la parte superior las pendientes con el perímetro de los deslizamientos. En la parte inferior, izquierda zonas viables en imágenes ascendentes: en naranja las que son viables, en tonos de gris las inviables, debido a los efectos geométricos en función de la pendiente: acortamiento, inversión del relieve o sombra; derecha viables en imágenes descendentes en azul y no viables en tonos de grises.

Estos dos mapas se filtraron teniendo en cuenta el rango de ángulos abarcable con DInSAR. En primer lugar se realizó el estudio correspondiente a la trayectoria descendente y posteriormente a la ascendente.

Descendente: Filtrado orientaciones: 200-340° y Pendientes:<67°

Ascendente: Filtrado orientaciones: 20-160° y Pendientes:<67°

Finalmente se superpusieron los perímetros de los deslizamientos preseleccionados con las zonas. (Figura 5.7).

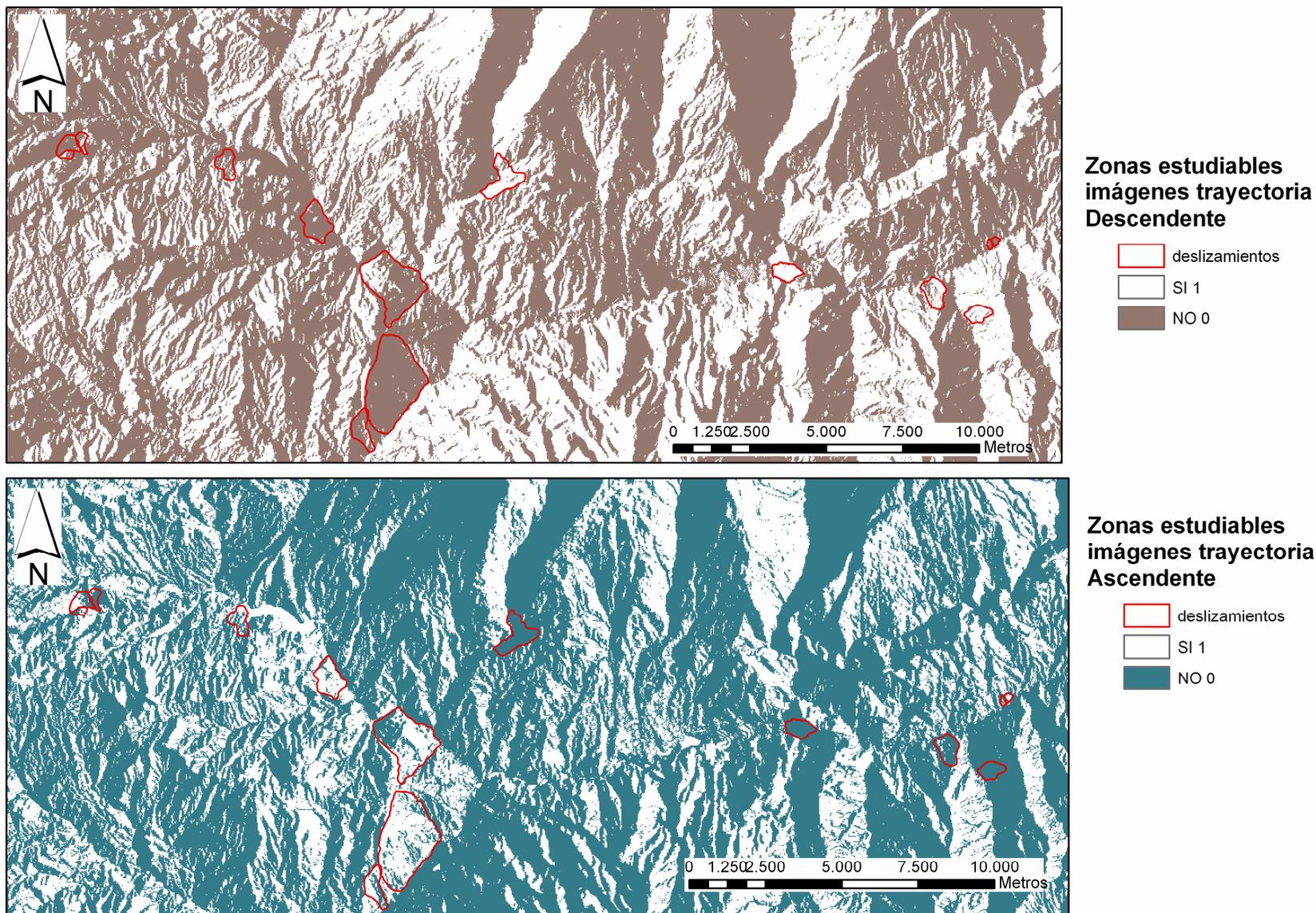


Figura 5.7: mapas de las zonas viables para cada una de las trayectorias: descendente y ascendente, integrando la orientación y la pendiente de las laderas y superponiendo el perímetro de los deslizamientos. El color blanco en ambos mapas corresponde con las zonas viables.

5.2.-DInSAR

5.2.1.-Fase General: realización de los interferogramas diferenciales

Esta fase es común a las modalidades 1 y 2, ya que consiste en el procesado de las imágenes para obtener los interferogramas diferenciales. Este proceso se ha realizado 2 veces: una para las imágenes de trayectoria descendente y otra para las de trayectoria ascendente.

La fase se ha realizado con el software comercial DIAPASON, distribuido por Altamira Información, disponible en la Unidad de Teledetección Activa (UTA) del Instituto de Geomática de Barcelona. Se exponen aquí los aspectos más importantes de la realización de esta fase, mientras que en el Anexo 3 se detalla todos los pasos del proceso.

El primer paso dentro de esta fase es la extracción de las imágenes. Se decidió realizar en compresión de 10 a 2 (10 en azimut y 2 en range), correspondiendo con un píxel cuadrado de 40x40m. La elección de esta resolución ha estado condicionada por varios factores. El primero de ellos es la gran extensión territorial con la que se trabaja, ya que tanto la cuenca del Río Guadalfeo como el área metropolitana de Granada son bastante extensas (400 Km² y 600 Km² respectivamente), y por tanto para poder abarcar una zona tan grande se hacía necesario trabajar con una resolución menor. La segunda es la disponibilidad de recursos técnicos e informáticos para la realización de los análisis de las imágenes resultantes. A mayor resolución y mayor extensión, más información es necesario procesar y por tanto más recursos temporales e informáticos son necesarios. Dado que una de las zonas de estudio (la cuenca del Río Guadalfeo) no era una zona urbana, donde existen gran cantidad de elementos reconocibles en la imagen Media de Amplitudes (mA) que pueden ayudar a la localización, fue imprescindible la extracción y posterior realización de los interferogramas con una transformación a píxeles cuadrados, en las que resolución sea la misma en las dos direcciones de la imagen.

Para la realización de la corregistración se realizó la elección de la imagen Super Máster, a cuya geometría se adaptan todas las demás. Para el caso de las imágenes descendentes se seleccionó la 20308 y para las ascendentes la 9851. Para realizar esta fase fue necesaria la realización de varias pruebas para cada una de las trayectorias, ajustando parámetros internos del programa, y verificando sus resultados, hasta encontrar el resultado óptimo de la corregistración.

Con las imágenes corregistradas se calculó la imagen media de amplitud (de cada una de las trayectorias). Las imágenes se recogen en las figuras 5.8 y 5.9.



Figura 5.8: imagen mA descendente.

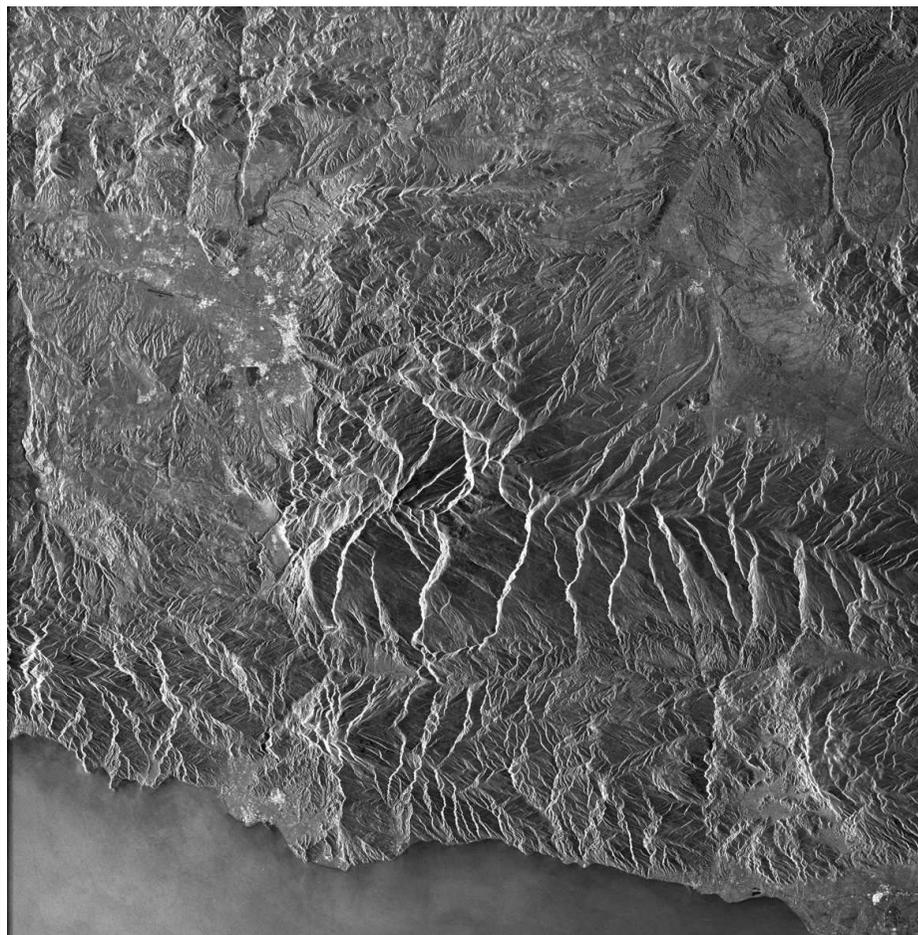


Figura 5.9: imagen mA ascendente

Posteriormente se calcularon los interferogramas diferenciales. Este paso requiere la realización de un interferograma sintético a partir de un DEM. En este caso se utilizó el DEM oficial de Andalucía para la provincia de Granada, realizado por la Consejería de Obras Públicas de la Junta de Andalucía, con resolución espacial de 20m.

De todos los interferogramas posibles se hizo una selección de aquellos que tienen un valor de base perpendicular y un intervalo temporal por debajo de un límite. En el caso de las imágenes descendentes los límites se establecieron en 380m de base perpendicular y 2200 días de intervalo temporal máximo. En el caso de las ascendentes los valores son de 400m de base perpendicular y 2200 días de intervalo temporal. Con ello el número total de interferogramas a usar fue de 72 y 48 respectivamente (tabla 5.3). En el Anexo1 se incluyen las tablas de las características de los interferogramas seleccionados de cada trayectoria.

	DESCENDENTE	ASCENDENTE
Nº IMÁGENES	25	15
Elección Imagen SM	20308	9851
Criterios de Selección Interferogramas:	At: 2200días B perpend. 380m	At: 2200 días B perpend. 400m
Nº Interferogramas	72	48

Tabla 5.3: tabla resumen de los datos relevantes de la Fase General DInSAR.

También se tuvo en cuenta la distribución temporal, a lo largo de todo el periodo de estudio, de los interferogramas diferenciales seleccionados. Las figuras 5.10 y 5.11 muestran su distribución para cada una de las dos trayectorias.

En la figura 5.12 se recogen a modo de ejemplo algunos de los interferogramas diferenciales utilizados para cada una de las trayectorias.

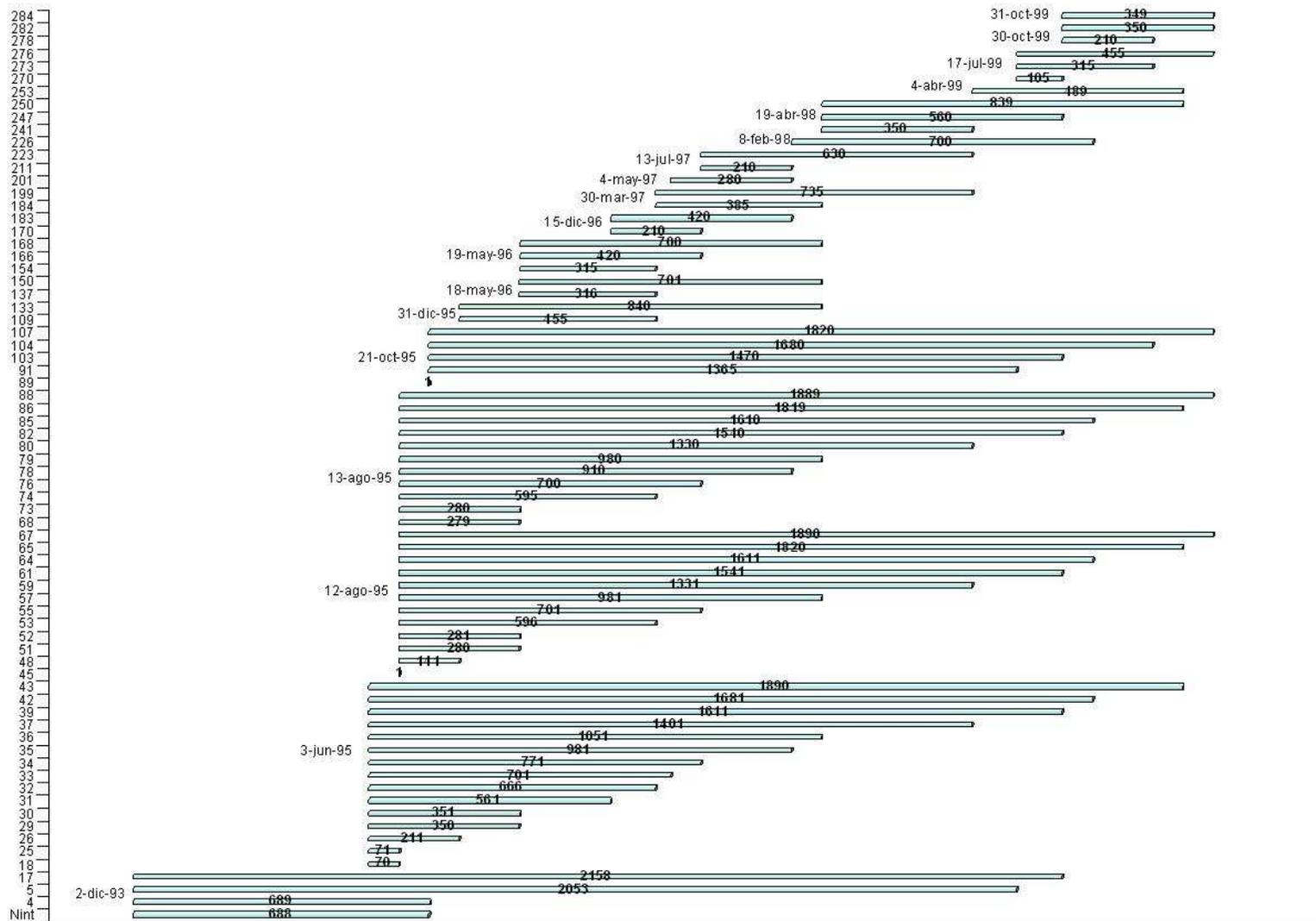


Figura 5.10: Distribución temporal de los interferogramas descendentes.

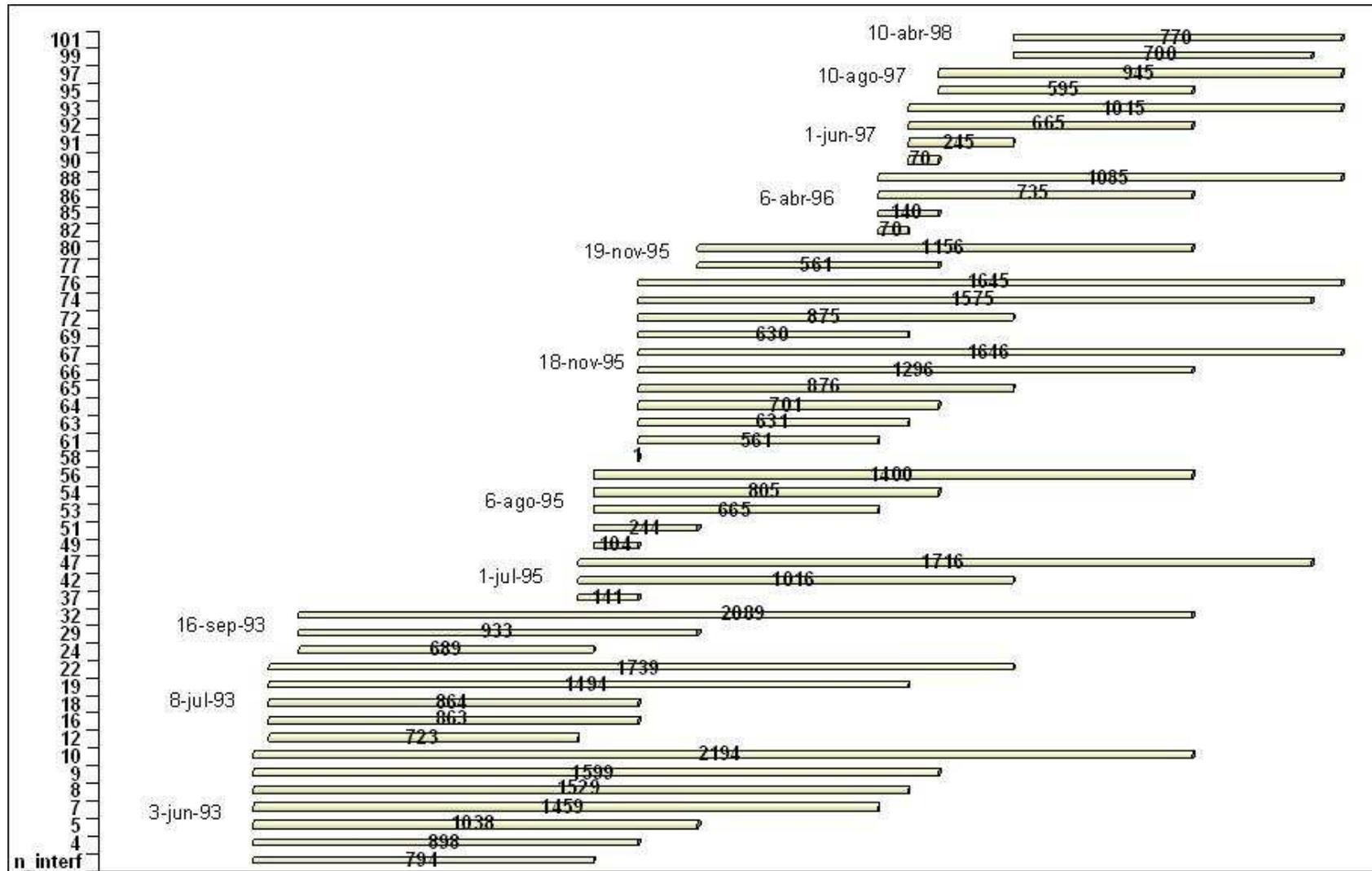


Figura 5.11: Distribución temporal de los interferogramas ascendentes

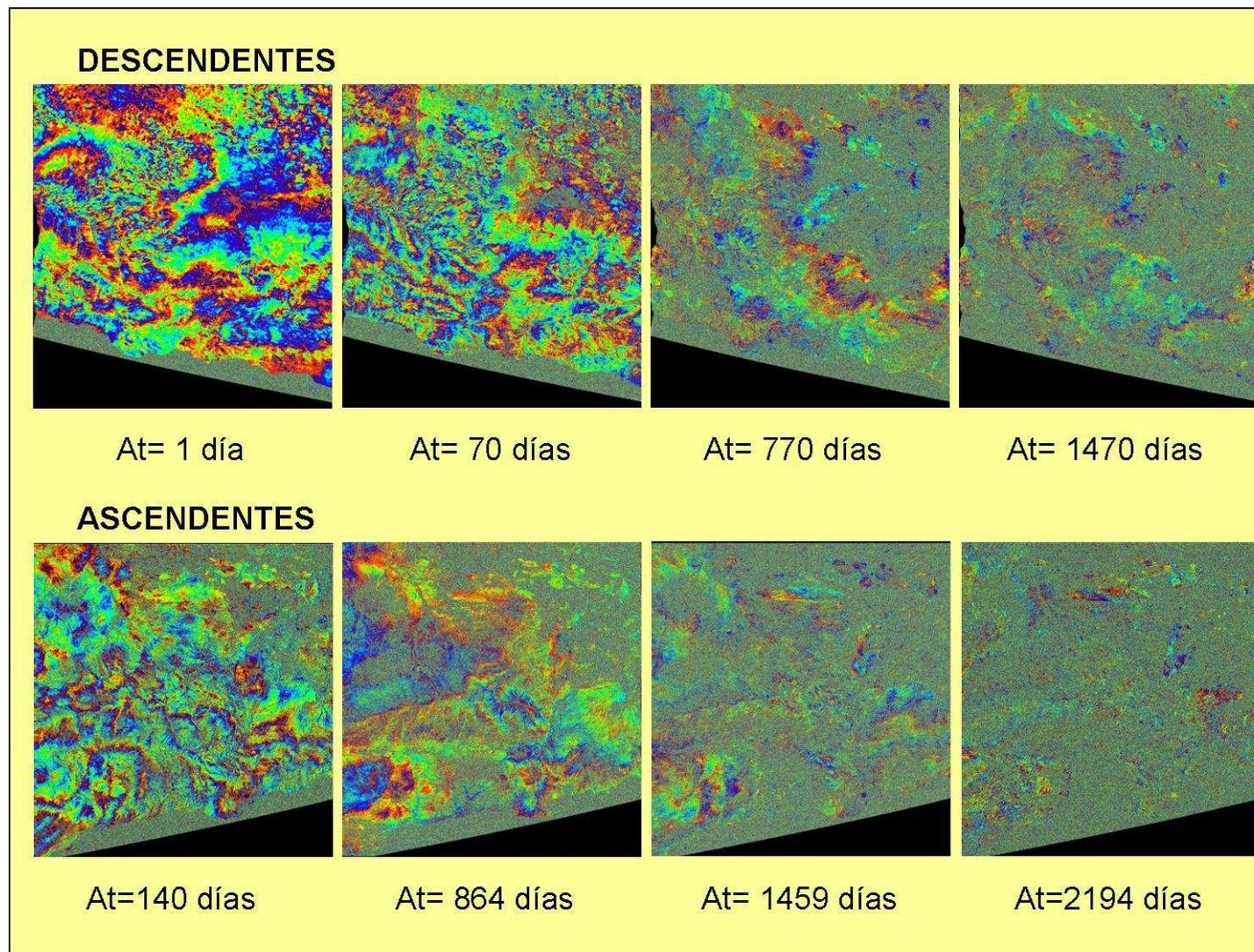


Figura 5.12: Ejemplo de algunos de los interferogramas usados. Se aprecia la pérdida de coherencia conforme se abarca un mayor intervalo temporal.

5.2.2.-Fase Específica. Aplicación del software para la estimación de la velocidad de deformación.

Se exponen a continuación los diferentes aspectos relativos a la aplicación a las zonas de estudio de esta fase, su ejecución mediante archivos y programas del software. Los algoritmos y aspectos fundamentales se encuentran recogidos en Biescas et al. (2007) y se han detallado en el Capítulo 4. Los esquemas y descripciones de los ficheros de entrada y salida del software son una aportación propia que se realizó durante la aplicación del software no comercial a los datos de este estudio.

Como las pruebas y análisis realizados en la UTA con esta metodología DInSAR Específica con anterioridad a esta investigación, se circunscribieron al ámbito urbano (Crosetto et al, 2005), una de las aportaciones de esta tesis es su aplicación en zonas de montañas con laderas afectadas por deslizamientos.

La fase específica no se realizó sobre el área completa de los interferogramas, ya que esto exigía recursos informáticos y un tiempo de procesado excesivo para la planificación de la Tesis Doctoral en la fase experimental. Para optimizar recursos informáticos y tiempo de procesado se procedió a realizar dos recortes, abarcando cada uno, una de las áreas de estudio.

En este caso se realizaron dos cortes para cada una de las trayectorias: uno correspondiendo al área de la cuenca del río Guadalfeo y otro del área metropolitana de Granada. (Figura 5.13 y Figura 5.14).

Para seleccionar las zonas de cortes se recurrió al reconocimiento visual sobre la imagen mA de localizaciones y elementos del territorio.

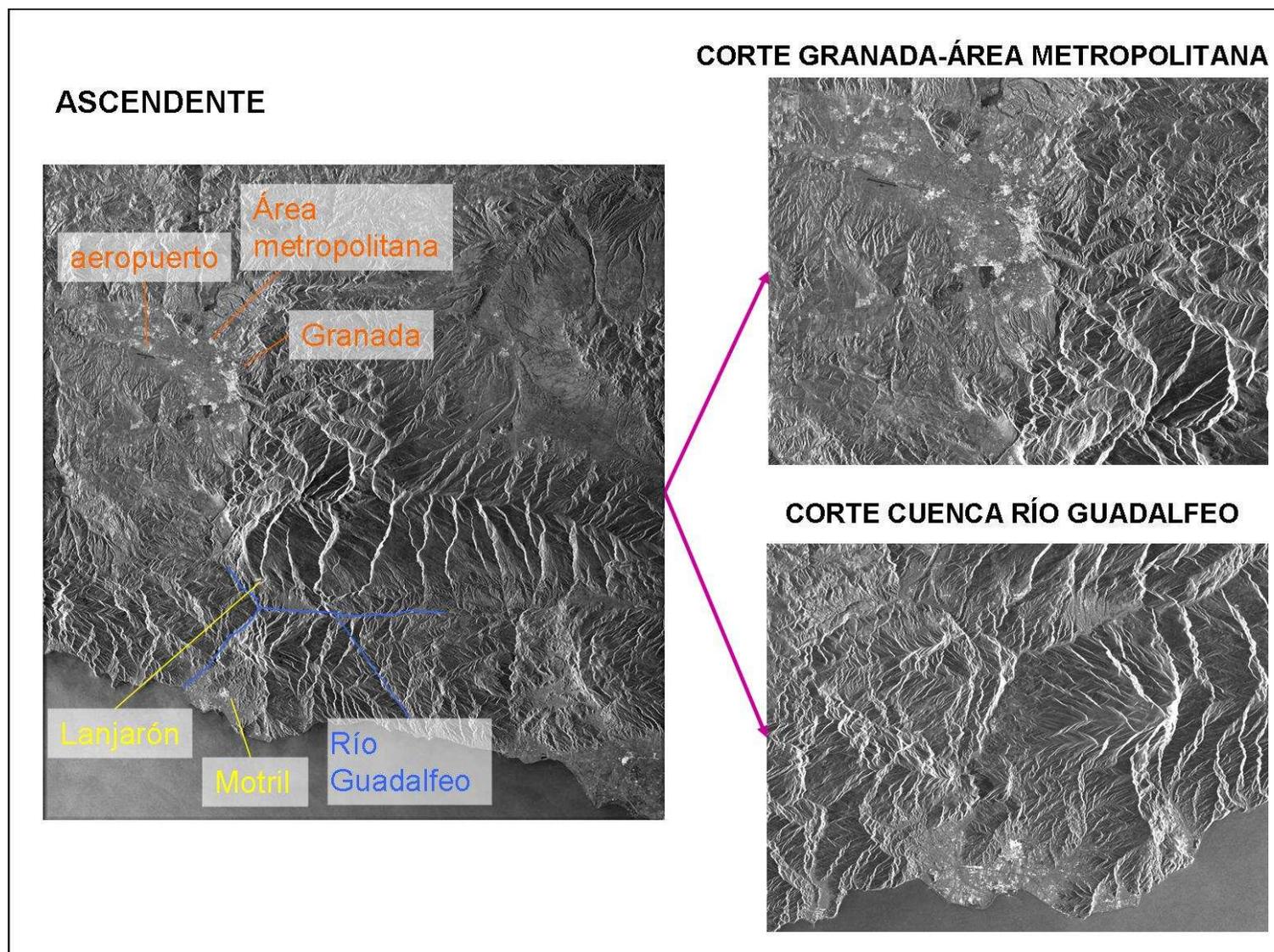


Figura 5.13: imagen mA ascendente con algunos de los elementos del territorio identificados. A la derecha cortes realizados para los estudios de las zonas de Granada y área metropolitana (arriba) y cuenca del río Guadalfeo (abajo).

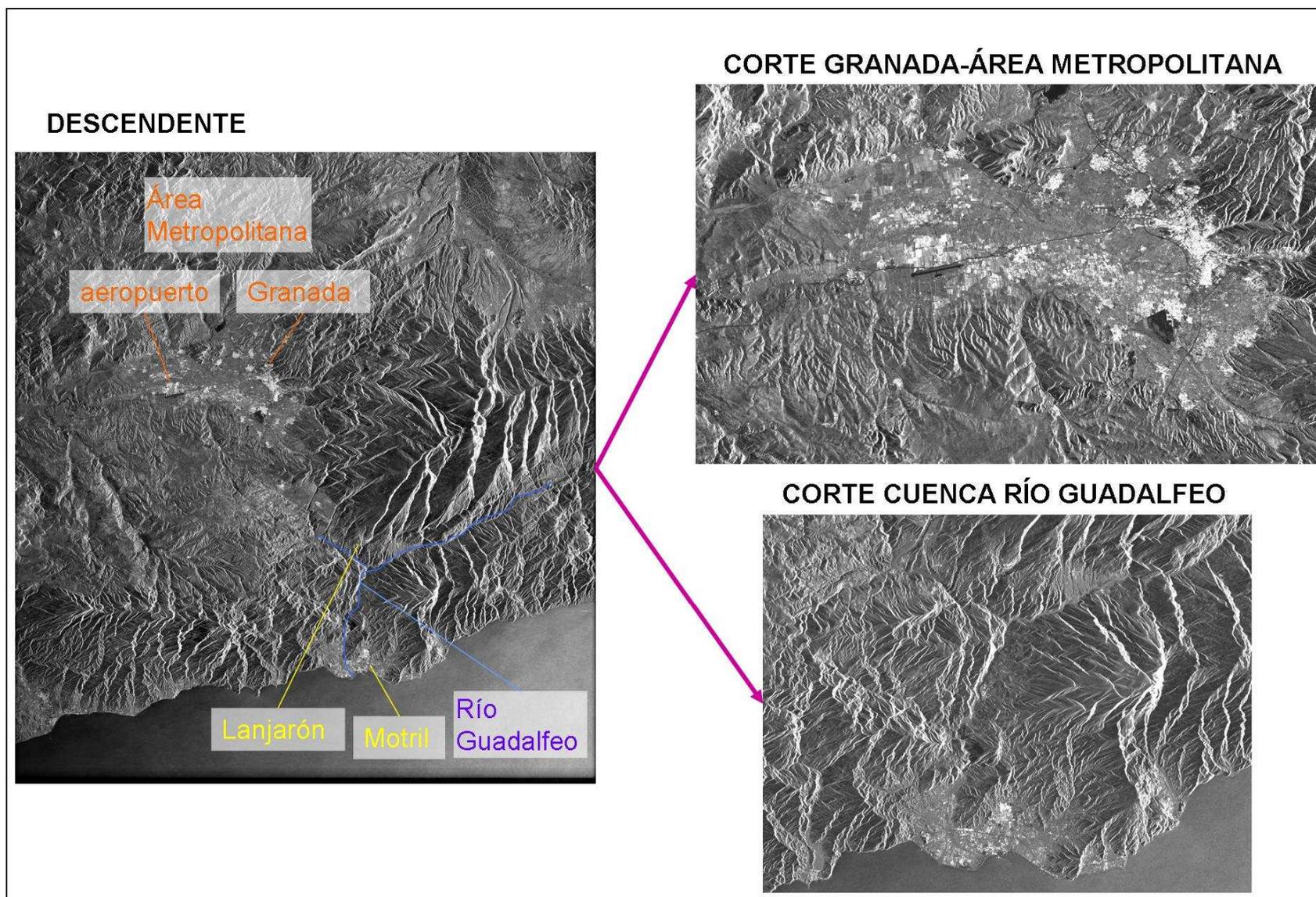


Figura 5.14: imagen mA descendente con algunos de los elementos del territorio identificados. A la derecha cortes realizados para los estudios de las zonas de Granada y área metropolitana (arriba) y cuenca del río Guadalfeo (abajo).

Criterios de selección de píxeles candidatos

El Paso 1 consiste en la selección de los píxeles de interés. Se realiza para garantizar la buena calidad de las fases de entrada, descartando los píxeles afectados por el ruido de la fase (*phase noise*).

La imagen con la máscara de píxeles “candidatos” en los cuales se aplicará el algoritmo se ha modificado con respecto a la utilizada hasta el momento en otros estudios. La modificación se realizó para estudiar los casos de los movimientos de ladera inventariados en la Cuenca del Guadalfeo, puesto que son zonas con mayor dificultad en la obtención de píxeles adecuados para el análisis que las zonas urbanas, y se aplicó posteriormente al resto de zonas de estudio. En el caso de los movimientos de ladera analizados el criterio de selección de puntos ha sido la combinación de varios factores.

La elección de los píxeles candidatos consiste en una serie de zonas disjuntas en las cuales se analizan el 100% de los puntos. También puede seleccionarse una única zona (Figura 5.15). Los criterios para selección que puntos se encuentran incluidos en estas regiones son:

1. Localización dentro de la zona incluida en el terreno afectado por el deslizamiento, dentro de su perímetro o muy cercanos, con lo que se podrían distinguir zonas incluidas en los propios deslizamientos, y zonas estables periféricas, que permitirán definir en ellos el punto de referencia, con movimiento 0, necesario para transformar de los resultados diferenciales relativos en valores de velocidad en términos absolutos.
2. Son zonas que poseen una buena respuesta a la radiación emitida por los sensores RADAR (son buenos reflectores), es decir que poseen un valor alto en la imagen media de amplitud mA, usada de base para realizar la selección de puntos y “dibujar” las zonas de píxeles a estudiar.

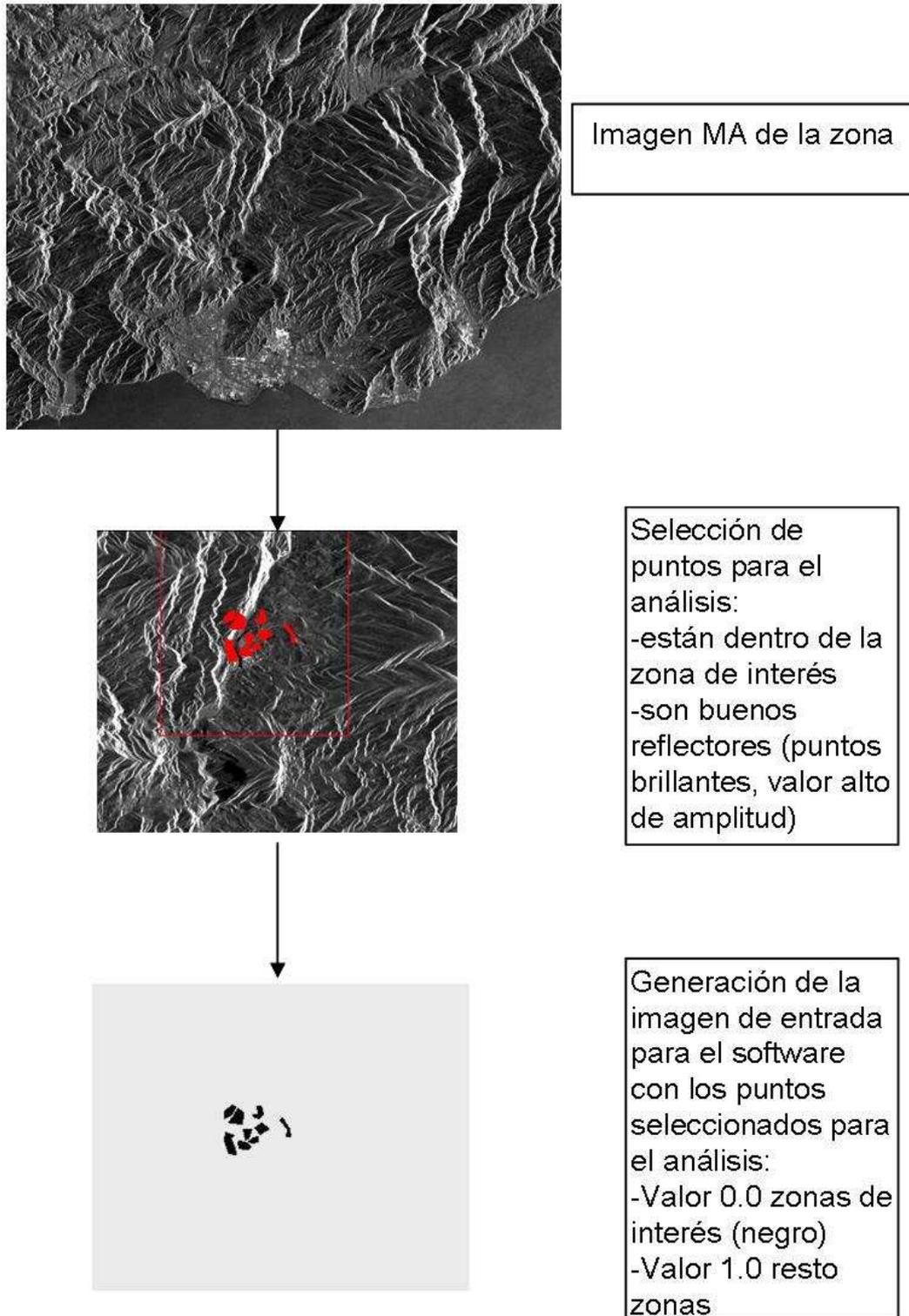


Figura 5.15: Esquema del proceso de la selección de puntos.

Aplicación del software para la obtención de velocidad de deformación

En este estudio el proceso, constituido por 3 etapas, como se explicó en el capítulo 2, se ha repetido dos veces, es decir que se ha realizado una primera estimación y posteriormente una segunda, en la que, además de los píxeles y aristas consideradas en la primera estimación, se han incluido otras, ya sean de nuevas zonas o de las zonas definidas anteriormente, con el fin de obtener una densificación de la red de aristas con respecto a la primera iteración, utilizando las resultantes de la primera estimación como base.

En la práctica estos pasos se concretan en 2 órdenes, cada uno de ellos con tres procesos, en los que es necesario disponer de una serie de archivos de diferentes tipologías para que los tres ejecutables que generan los resultados funcionen correctamente. En las siguientes figuras (Figura 5.16) y (Figura 5.17) se exponen los ficheros de entrada (inputs) y de salida (outputs) de cada uno de ellos.

Primer orden

Proceso 1º: etopo vellin⁵

Entradas:

- Fichero .bat con toda las informaciones necesarias para ejecutar el fichero .exe
- Imagen DA: es la imagen con las zonas sobre las que se realizará la selección de puntos.
- Interferogramas: son las imágenes fundamentales sobre las que se realizaran los cálculos de estimación de la velocidad por parte del software.
- Cabecera de los interferogramas: contiene la información necesaria para poder interpretar los interferogramas: número y denominación de los mismos, número de filas y columnas que los forman...

Salidas:

- In.txt. contiene la información de entrada suministrada.
- Punts_select_random.txt: contienen los puntos totales considerados en el orden aleatorio en el que los han sido por el software. Para cada uno de ellos aparece el número de punto, columna y fila.

⁵ Es el nombre interno que se le ha dado a la fase del proceso correspondiente al cálculo de aristas y su red.

- Punts_totals.txt: contiene el número de puntos totales considerados: contiene la información número de puntos totales, número de punto, columna y fila.
- Arestes_considerades.txt: archivo en el que se incluyen todas las aristas consideradas antes de su selección: aparece la información en relación al del punto central considerado: para cada una de las aristas: píxel de inicio, píxel de fin, longitud de arista, valor DA. Para cada punto: la triangulación, velocidad en el circuito realizado mediante las aristas y diferencial de topografía en el circuito, que tiene que ser cero para poder cerrar el circuito correctamente. Aparece también el número de aristas buenas.
- Punts_bons.txt: puntos buenos seleccionados con información del número de punto, columna, fila.
- Arestes_seleccio.txt: contiene la información de las aristas seleccionadas.
- OUT_etopo_vellin.txt: posee la información de entrada resumida, la lectura del punto, las fases del programa, indicando si se han completado con éxito o ha habido fallos, incluye la lectura de la fase de los píxeles (triangulación, circuito realizado y selección de aristas).

Proceso 2º: reordenación

Entradas

- Llistat_punts.txt: archivo que contiene el listado de los ficheros de puntos que se van a reordenar procedentes del primer proceso. Se puede reordenar un solo fichero, de una zona considerada en el proceso anterior, o bien más de uno, procedentes del primer proceso en zonas colindantes o cercanas que se quieran considerar de forma conjunta.
- Llistat_arestes.txt: archivo que contiene el listado de los ficheros de las aristas que se van a reordenar procedentes del primer proceso. Se puede reordenar un solo fichero de una zona considerada en el proceso anterior, o bien más de uno, procedentes del primer proceso en zonas colindantes o cercanas, que se quieran considerar de forma conjunta.
- Punts_bons.txt: puntos buenos seleccionados con información del número de punto, columna, fila. Procedente de la salida del proceso anterior.
- Arestes_seleccio.txt: contiene la información de las aristas seleccionadas. Procedente de la salida del proceso anterior.

Salidas

- In.txt. contiene la información de entrada suministrada.
- Informacio.txt: contiene la información del proceso que se concreta en el número de grupos que se han formado, y dentro de cada uno de ellos, el número de aristas y de puntos que los forman, así como las limitaciones dadas para la ejecución del proceso: valor de la función gamma umbral para considerar la arista y número mínimo de aristas por punto para aceptarlo.
- punts_grup1.txt: contiene la información de los puntos que constituyen el grupo 1: número de punto, columna y fila. Habrá tantos como grupos se hayan generado: desde 1 hasta n.
- arestes_grup1.txt: contiene la información de las aristas que constituyen el grupo 1: número de punto inicial y final, diferencial de velocidad, diferencial de topografía y valor de gamma de la arista. Habrá tantos como grupos se hayan generado: desde 1 hasta n.
- xarxa_grup1.txt: contiene la información de la red generada por las aristas y los puntos del grupo 1: por cada arista su punto final e inicial y el valor de la función gamma. Habrá tantos como grupos se hayan generado: desde 1 hasta n.
- mapa_grups: mapa en el que se visualizan los puntos asignados a cada grupo generado en la reordenación. Para cada punto se indica el grupo al que pertenece pudiéndose realizar la visualización del número de grupos generados, el número de puntos de cada uno y su localización.

Proceso 3º: integración

Se tendrá que realizar para cada uno de los grupos generados en el proceso anterior que cubran la zona de interés.

Entradas

- punts_grup1.txt: contiene la información de los puntos que constituyen el grupo 1: número de punto, columna y fila.
- arestes_grup1.txt: contiene la información de las aristas que constituyen el grupo 1: número de punto inicial y final, diferencial de velocidad, diferencial de topografía y valor de gamma de la arista.

- `tabel_pseudo.txt`: fichero que contiene la información del número de zonas a integrar (1), el nombre de la zona, el valor de la velocidad en los píxeles o píxel de la máscara (0) y el valor de confianza σ (0.001).
- `masquera`: imagen máscara que contiene los puntos o punto seleccionados como estables.

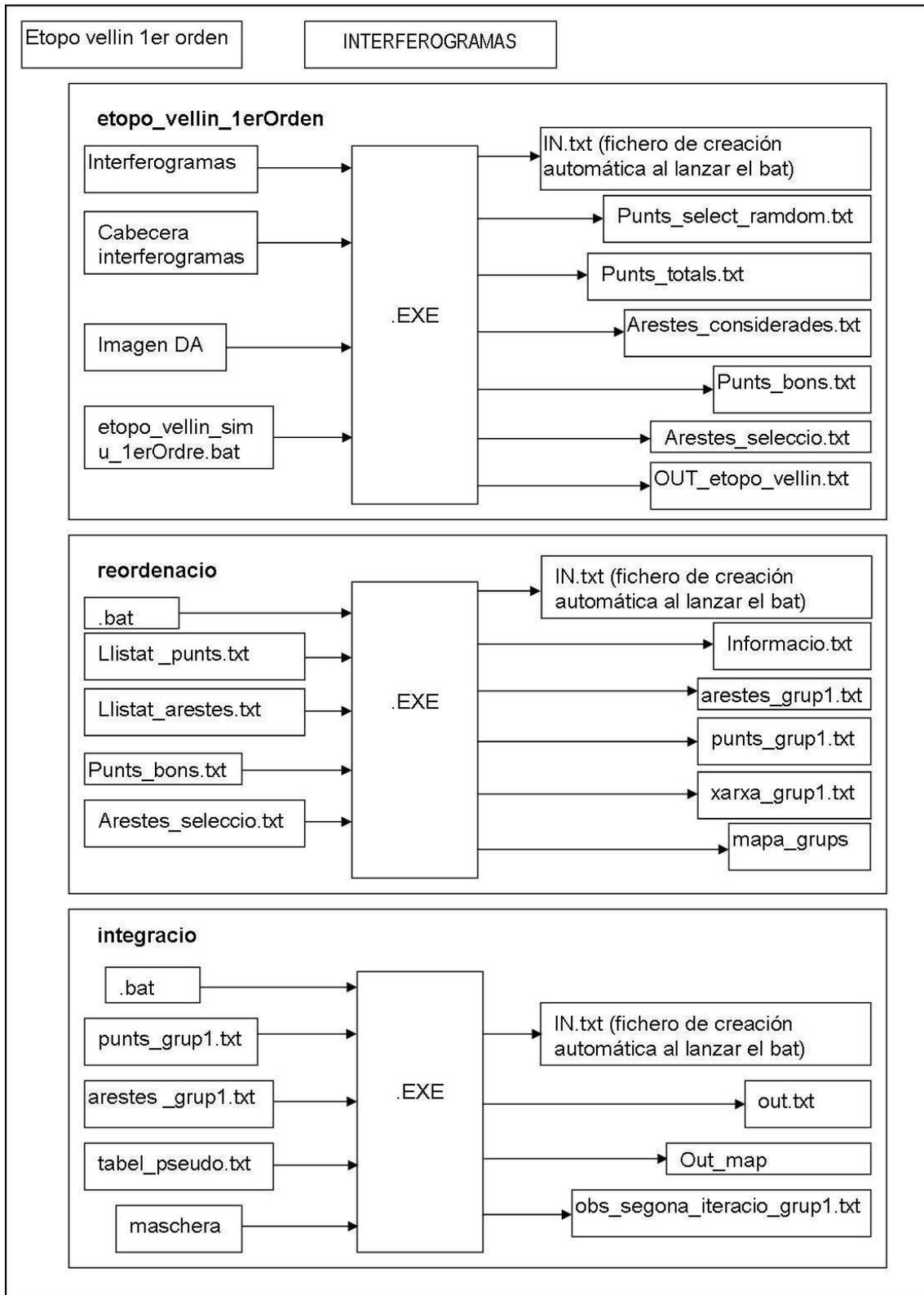


Figura 5.16: procesos integrados en el primer orden del software para la estimación de la velocidad de deformación.

Salidas

- In.txt. contiene la información de entrada suministrada.
- Out.txt: contiene una serie de líneas con información sobre el sistema y el programa usado; estructurado en dos partes: la primera con columnas que contienen la información sobre número del punto, la velocidad y el error. La segunda consta de una serie de columnas donde se recogen informaciones como el número de observación, número de punto inicial, número de punto final, velocidad estimada con el programa, velocidad observada, error de la observación, residuo (diferencia entre observada y estimada) y la redundancia.
- Out_map: es la imagen en la que aparecen los resultados de la estimación de la velocidad de deformación (o la topografía según que integración se haya realizado) para cada uno de píxeles de la zona de estudio considerada. De forma que los píxeles no considerados aparecerán sin valor y los considerados con el valor de la estimación correspondiente referidos al píxel o píxeles de referencia establecidos.
- obs_segona_iteracio_grup1.txt: archivo con la información de las aristas seleccionadas, válido para realizar una segunda iteración.

Segundo Orden

La segunda iteración se realiza partiendo de la red obtenida en el primer orden con los tres procesos antes descritos y tiene como propósito aumentarla y añadir nuevos puntos y aristas. Por analogía a los métodos de topografía y navegación podemos decir que se trata del establecimiento de una red de aristas de segundo orden partiendo de las ya obtenidas y estimadas a modo de red de primer orden.

Para realizar el segundo orden las fases son similares a las del primer orden ya descrito, con algunas modificaciones que se comentarán a continuación. El esquema del segundo orden análogamente al anterior se muestra en la Figura 5.17.

Proceso 1º: etopo vellin 2º orden

Entradas:

Al igual que en el primer orden hay que introducir los interferogramas y la cabecera, así como el fichero .bat correspondiente a este proceso.

- Imagen DA: es la imagen con las zonas sobre las que se realizará la nueva selección de puntos. Hay que tener en cuenta cual ha sido el resultado del primer orden para así

establecer las zonas o zona sobre la que se va a realizar el segundo orden. Así pues, en el caso de que la zona de interés seleccionada en un primer momento no haya sido cubierta, lo suficientemente, por los píxeles obtenidos en el primer orden, se puede introducir la misma zona para realizar una densificación de la red aristas y puntos obtenida. Si la zona en el primer orden se ha cubierto lo suficientemente, entonces se puede ampliar o seleccionar zonas cercanas relacionadas con las primeras, para realizar con el segundo orden una ampliación de la red y extenderla superficialmente.

- `mask_punts1erOrdre`: se trata de una imagen en la que aparecen los puntos en los que se ha estimado la velocidad de deformación en el primer orden.
- `obs_segona_iteracio_Dvelo.txt`: se corresponde con el fichero output de la integración del primer orden `obs_segona_iteracio_grup1.txt`, cuando la integración sea la de la velocidad.
- `obs_segona_iteracio_Detopo.txt`: se corresponde con el fichero output de la integración de la topografía del primer orden `obs_segona_iteracio_grup1.txt`. En el caso de no haberse estimado la topografía como es nuestro caso, entonces se utiliza el archivo de la velocidad cambiándole el nombre, es decir que los dos archivos son coincidentes.

Salidas:

Los archivos generados como salida de este proceso, son análogos a los del primer orden, con la información actualizada correspondiente al proceso actual. Sólo existe un nuevo archivo:

- `Punts_ja_integrats.txt`: contiene la información de los puntos integrados en el proceso del primer orden y son la base para la selección de los nuevos puntos y sus aristas en este segundo orden.

Los Procesos 2º: reordenación y 3º: integración no presentan ninguna modificación con respecto al primer orden, por lo que se procede del mismo modo que en el primer orden, a partir de los ficheros de salida del primer proceso del segundo orden.

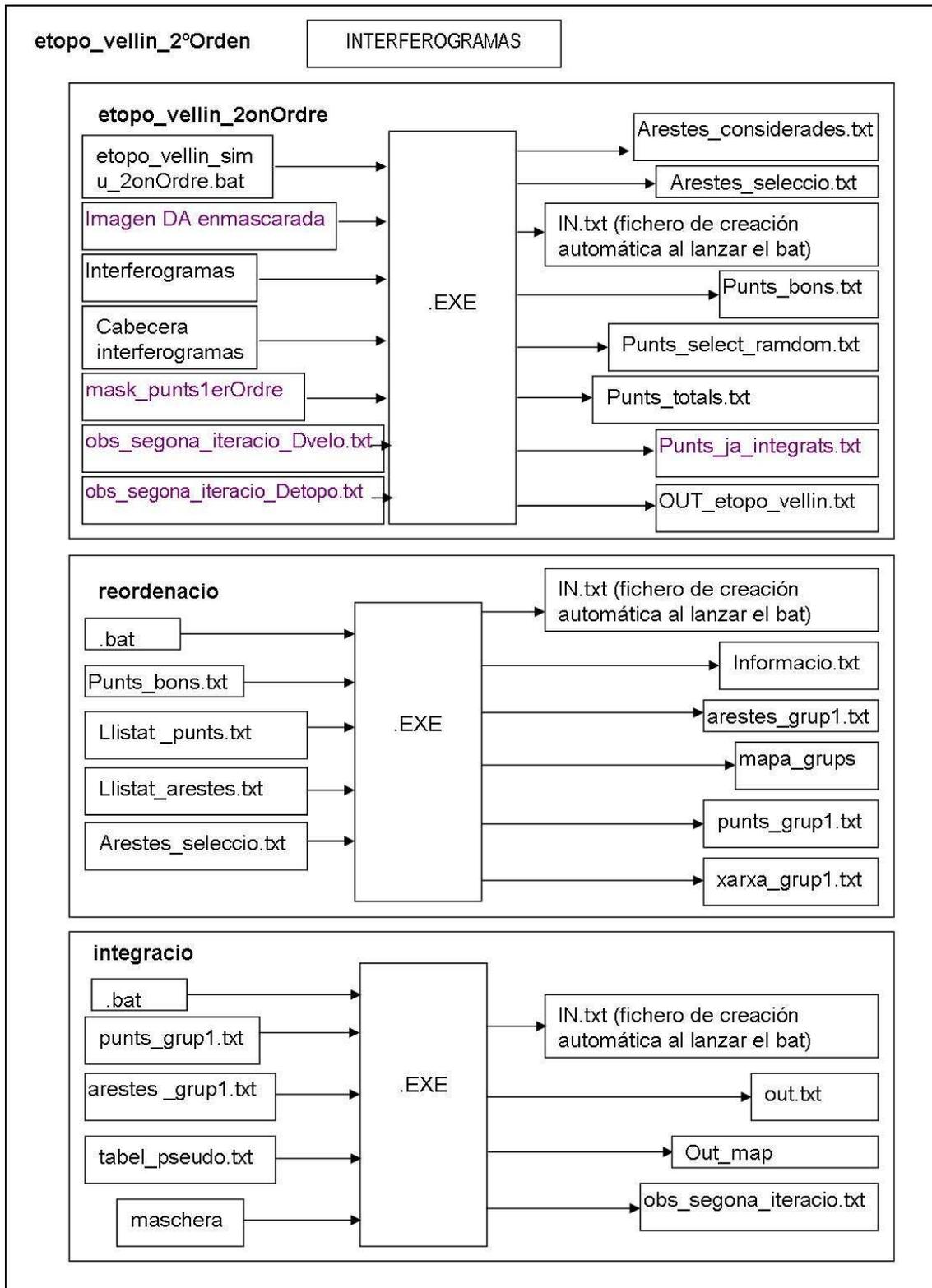


Figura 5.17: procesos integrados en el segundo orden del software para la estimación de la velocidad de deformación. En violeta se destacan las diferencias con respecto al primer orden.

5.2.3.-Resultados obtenidos en la fase DInSAR

Al final de la Fase DInSAR se han obtenido una serie de resultados en las distintas zonas analizadas (Tabla 5.4).

Estos resultados pasan a ser tratados y analizados en la fase Post DInSAR, y se expondrán detalladamente en el Capítulo 6.

Sin embargo, hay zonas de estudio en las que no se han podido obtener resultados. Estos casos se dan en algunos de los movimientos de ladera de la Cuenca del Río Guadalfeo que se habían seleccionado para el estudio. Se han podido obtener resultados satisfactorios en tres de ellos: el Barranco de Mezquerina (Zona 5), el Deslizamiento de Tablones (Zona 8) y Albuñuelas (Zonas 12-13) (Figura 5.18, representados en color verde). Los resultados de los dos primeros se han obtenido del análisis DInSAR con imágenes descendentes y los del último con las imágenes ascendentes.

En los demás casos no se han obtenido resultados por diferentes causas vinculadas a distintas etapas del procesado. En dos de los casos (Zonas 7 y 14) no es posible su estudio por la orientación de los mismos (dirección N-S), por lo que en la fase PREDInSAR se comprobó que no eran viables (Figura 5.18, representados en color violeta). En el caso más frecuente, que se ha dado en movimientos de ladera de mayor tamaño, los motivos han estado relacionados con la pérdida de coherencia en la zona, con lo que el número de píxeles obtenidos en el procesado ha sido muy bajo o nulo y su distribución muy dispersa, por lo que no se ha llegado a obtener resultados (Figura 5.18, representados en color gris). El último tipo de casos fallidos lo tenemos en Torvizcón (Zona 10), donde se han obtenido con el procesado DInSAR píxeles suficientes, pero con la particularidad de que la inmensa mayoría están en la zona afectada por el deslizamiento y no existe ninguno en la inmediaciones de esta zona que pudiera establecerse como zona estable, por lo que no podemos asignar valores de desplazamiento a las zonas obtenidas (Figura 5.18, representado en color ocre).

ZONA	RESULTADOS FASE DInSAR			
	CON RESULTADOS	SIN RESULTADOS		
		Orientación N-S	Pérdida coherencia	Sin zona estable
1			X	
2			X	
3			X	
4			X	
5	X			
6			X	
7		X		
8	X			
9			X	
10				X
11			X	
12-13	X			
14		X		

Tabla 5.4: resultados de la fase DInSAR en las zonas de estudio de la Cuenca del Río Guadalfeo



Figura 5.18: Casos encontrados en la aplicación del proceso DInSAR en los movimientos de ladera de la Cuenca del Río Guadalfeo.

5.3.-POST DINSAR

Al disponer de informaciones previas y cartografía de las zonas estudiadas en una aplicación de un sistema de información geográfica (SIG) desarrollada en el software ArcGIS 9.1 (ESRI), se realizó una transformación del formato de datos de los resultados geocodificados para poder integrarlos y analizarlos en el SIG. La transformación convirtió los resultados en una capa de información de tipo ráster en el que cada celdilla se corresponde con un píxel. Con ello se consiguió integrar los resultados con las diferentes informaciones disponibles en las zonas de estudio como son:

- Ortofoto digital en Blanco y Negro, del año 2001 de la Junta de Andalucía: Ortofotografía Pancromática de Andalucía, escala 1:5000 del año 2001, con resolución geométrica de 0.5m. La Ortofoto digital de Andalucía ha sido generada a partir del vuelo fotogramétrico Blanco y Negro a escala aproximada 1:20000 entre los años 2001 y 2002.
- Ortofoto digital en Color, del año 1998 de la Junta de Andalucía: Ortofotografía en color de Andalucía, escala 1:10000 del año 1998, con resolución geométrica de 1m. La Ortofoto digital de Andalucía ha sido generada a partir del vuelo fotogramétrico color a escala 1:60000 entre los años 1998 y 1999.
- Mapa topográfico de Andalucía escala 1.10.000, de la Junta de Andalucía, año 2002, en formatos ráster (formato TIFF, con resolución de 0.8m) y vectorial (capas de información agrupadas en los siguientes temas: Divisiones Administrativas, Relieve, Hidrología superficial, Vegetación, Edificaciones, Vías de comunicación, Infraestructuras hidráulicas y Toponimia).
- Capas de información en formato vectorial de aspectos generales del territorio, como sistemas urbanos, red viaria, red hidrográfica, divisiones administrativas, relieve, etc, pertenecientes al Mapa Topográfico de Andalucía escala 1:100.000, del año 1999.
- Captaciones de aguas, sondeos, pozos, unidades hidrogeológicas, etc. en formato vectorial procedentes del IGME, Diputación Provincial de Granada, y en formato papel (y posteriormente digitalizados personalmente) de la Comunidad de Regantes del municipio de Santa Fe, Ayuntamiento de Santa Fe y Otura.
- Información geológica, como la litología y las fallas, en formato vectorial procedente del IGME, hojas MAGNA 50, escala 1:50.000. La publicación de la serie se ha

realizado desde el año 1972 (las hojas de las zonas de estudio se publicaron entre 1974 y 1988) y su revisión y digitalización desde el año 1991.

- Coordenadas de epicentros de terremotos ocurridos en la zona de la provincia de Granada en formato digital (transformadas en capa de información GIS personalmente), procedente del Instituto Geográfico Nacional (IGN)
- Callejeros de núcleos urbanos en formato vectorial, escala 1:2000, procedentes de la Base de Datos Territorial de ámbito municipal de la Diputación de Granada, del año 2006.

Todo ello ayudó a interpretar, localizar y analizar los valores de desplazamiento obtenidos en cada una de las zonas estudiadas (Figura S).

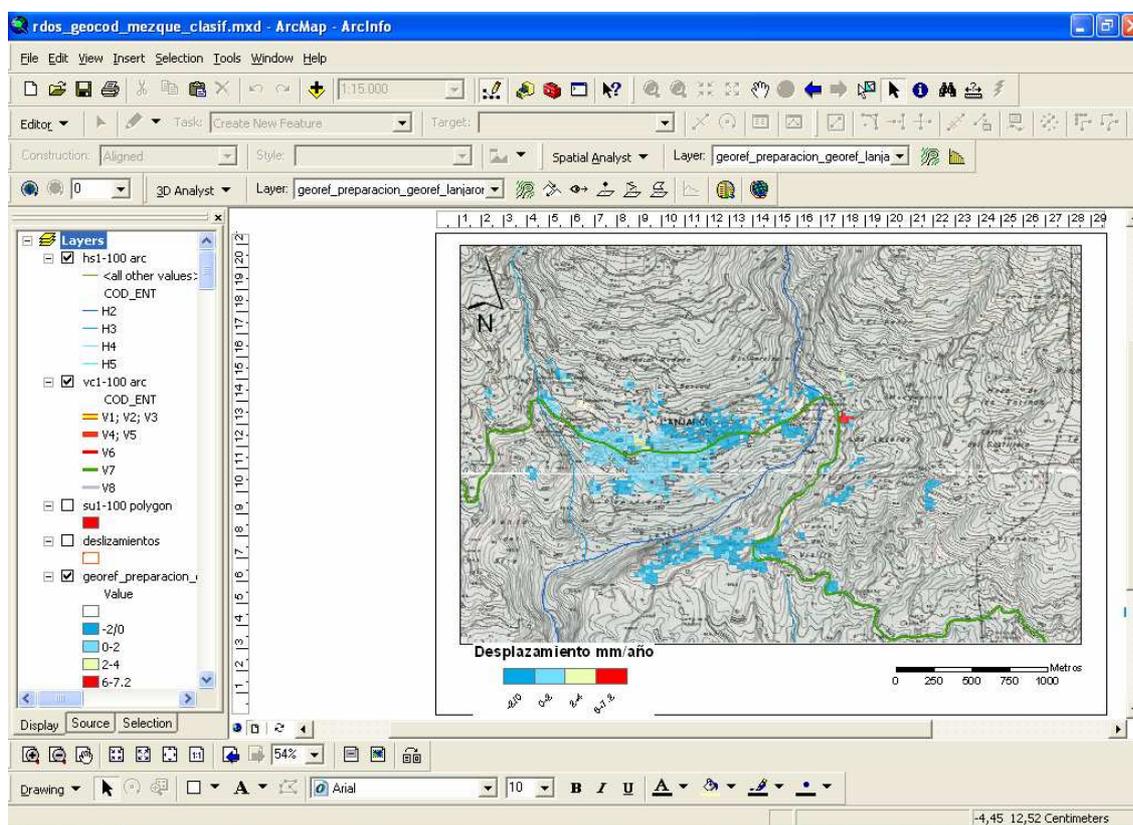


Figura S: ejemplo de integración de los resultados DInSAR con otras informaciones en un SIG (ArcGIS), para su análisis e interpretación.

6.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La interpretación de los resultados del análisis DInSAR de la región se ha realizado en el seno del Grupo de Investigación que bajo la dirección del Prof. Chacón ha realizado los proyectos (REN2002-12726-E, CGL2005-03332, P06-RNM) y la propia actividad del grupo RNM121 del Plan Andaluz de Investigación. La complejidad de los procesos de deformación del terreno identificados ha sido muy variable, como se verá y han requerido conocimientos, geológicos, geomorfológicos y geotécnicos para explicar hechos en algunos casos desconocidos hasta el momento, y en otros que obligaron a un completo replanteamiento de las hipótesis de partida.

Como se ha mencionado en anteriores capítulos, los resultados del análisis DInSAR se expresan en tasas de deformación medidas en la dirección de visión del sensor radar, llamada *Line of sight* (LOS), que se inclina 23° aproximadamente respecto a la vertical.

Los movimientos de ladera se asocian a zonas donde la topografía no es llana, por lo que resulta necesario tener en cuenta que las tasas de deformación estimadas mediante DInSAR pueden expresar tanto procesos de elevación como de hundimiento, ya que al desplazamiento descendente de la masa se añade el efecto de la rugosidad de la topografía (Figura 6.1). (Farina et al, 2006).

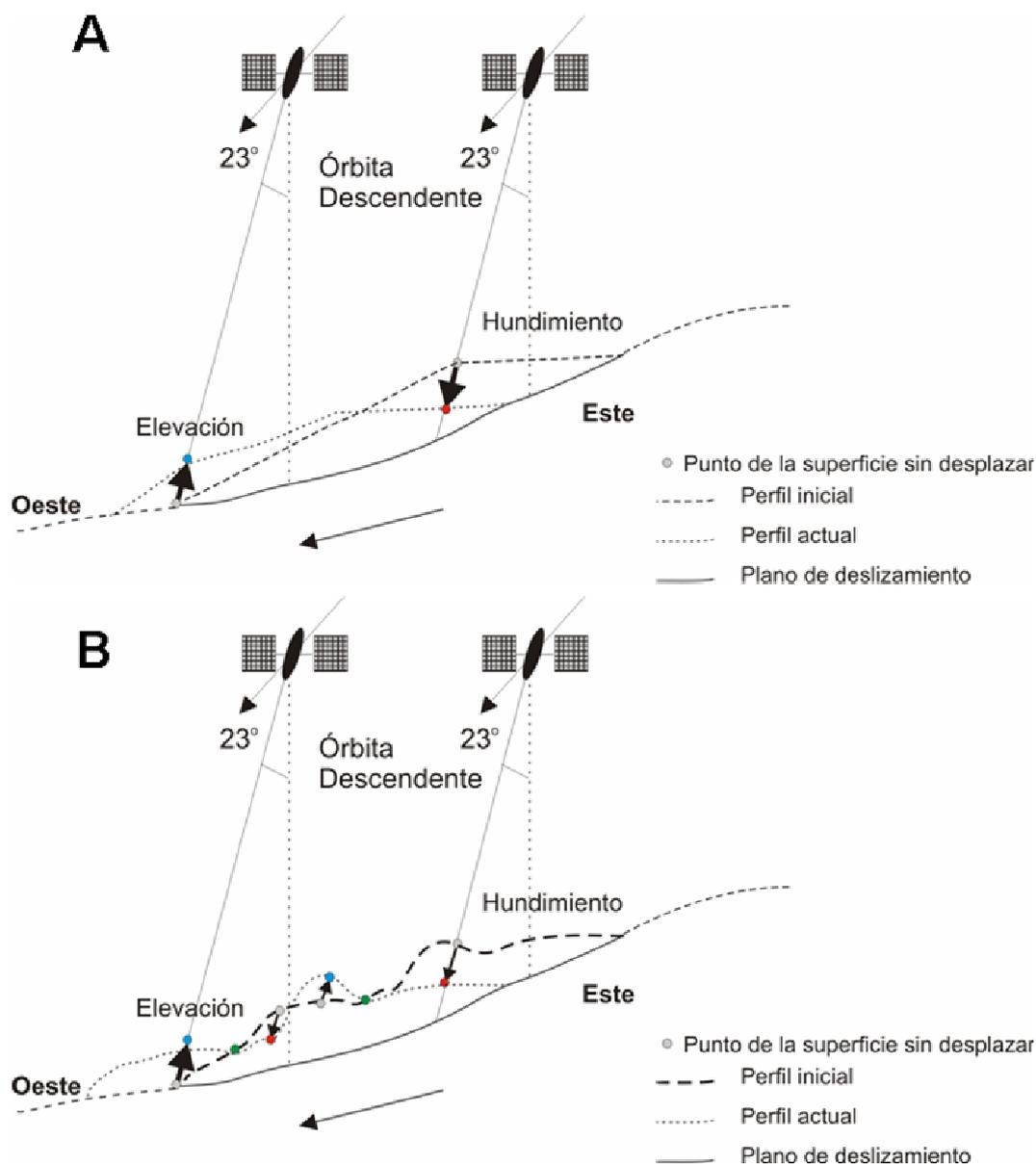


Figura 6.1: Geometría de adquisición con respecto a movimientos de ladera Este-Oeste. A: Caso de topografía simple. El deslizamiento traslacional se registra como hundimiento, con pérdida de materiales en la cabecera y como elevación, con ganancia de material, en el pie. B: Caso de ladera de superficie rugosa. El deslizamiento se registra como hundimiento en la cabecera y elevación en el pie. En la zona central de la superficie de la masa existen píxeles con hundimiento, elevación y sin variación de cota.

Las zonas de estudio han permitido analizar resultados con diversos grados de complejidad en la interpretación de los resultados obtenidos.

6.1.- CUENCA DEL RÍO GUADALFEO

En primer lugar se describen las zonas en las que se han obtenidos resultados satisfactorios e interpretados como parte de procesos geomorfológicos identificados: Serreta de Tablones (Órgiva) y Albuñuelas.

Posteriormente se analizan los sectores en los cuales los resultados no han sido concluyentes, ya sea por limitaciones de los resultados obtenidos o por la dificultad de su interpretación.

6.1.1.-La Serreta de Tablones

El deslizamiento de La Serreta de Tablones afecta a la cara suroeste de la Sierra de Jubiley, en el término municipal de Órgiva. Se trata de un deslizamiento traslacional de un bloque de mármoles triásicos sobre una unidad de Filitas del Paleozoico Superior, que afecta al margen derecho de un afluente subsidiario del Río Guadalfeo, llamado Ría del Granadino. (Figura 6.2). Este deslizamiento se consideraba en una fase de actividad dormido o intermitente, por la ausencia de evidencias de deformaciones actuales que afectasen a la ladera o a la morfología del río (Fernández, 2001), y sin que hubiera sido posible una precisión mayor.

mm/año), y en su práctica totalidad se encuentran fuera de los límites del deslizamiento. Fuera del deslizamiento se encuentran también 18 de los 20 píxeles con valores de elevación entre 3 y 1.2 mm/año, y 226 de los 244 píxeles entre 1.2 y 2.4 mm/año de hundimiento. Como cabía esperar la mayor parte de los píxeles con valores LOS de movimiento mayor, entre 2.4 y 3.6mm/año de hundimiento (105 de 134); 3.6 y 4.8 (30 de 36); y 4.8 a 6 mm/año (8 de 9) se encuentran incluidos en la superficie topográfica de la masas deslizada, correspondiendo con el desplazamiento ladera abajo. Se aprecian muy pocos píxeles con movimiento de elevación (2 de entre 3 y 1.2 mm año y 23 de entre 1.2 y 0mm/año), principalmente en el pie del deslizamiento asociados a la acumulación de materiales movilizados. Los escasos píxeles con elevación que se han detectado en la masa del deslizamiento están asociados a la irregularidad de la superficie de los materiales que se desplazan.

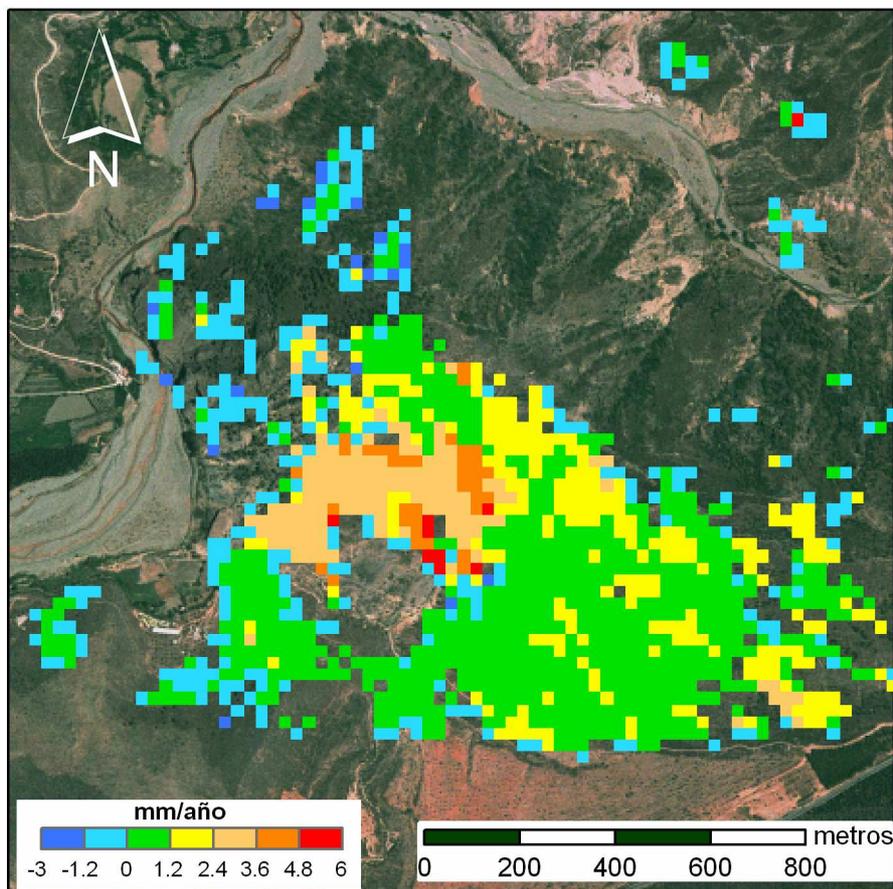


Figura 6.3: Resultados obtenidos mediante la aplicación de la Metodología con la técnica DInSAR, representados sobre la ortofoto de la zona estudiada.

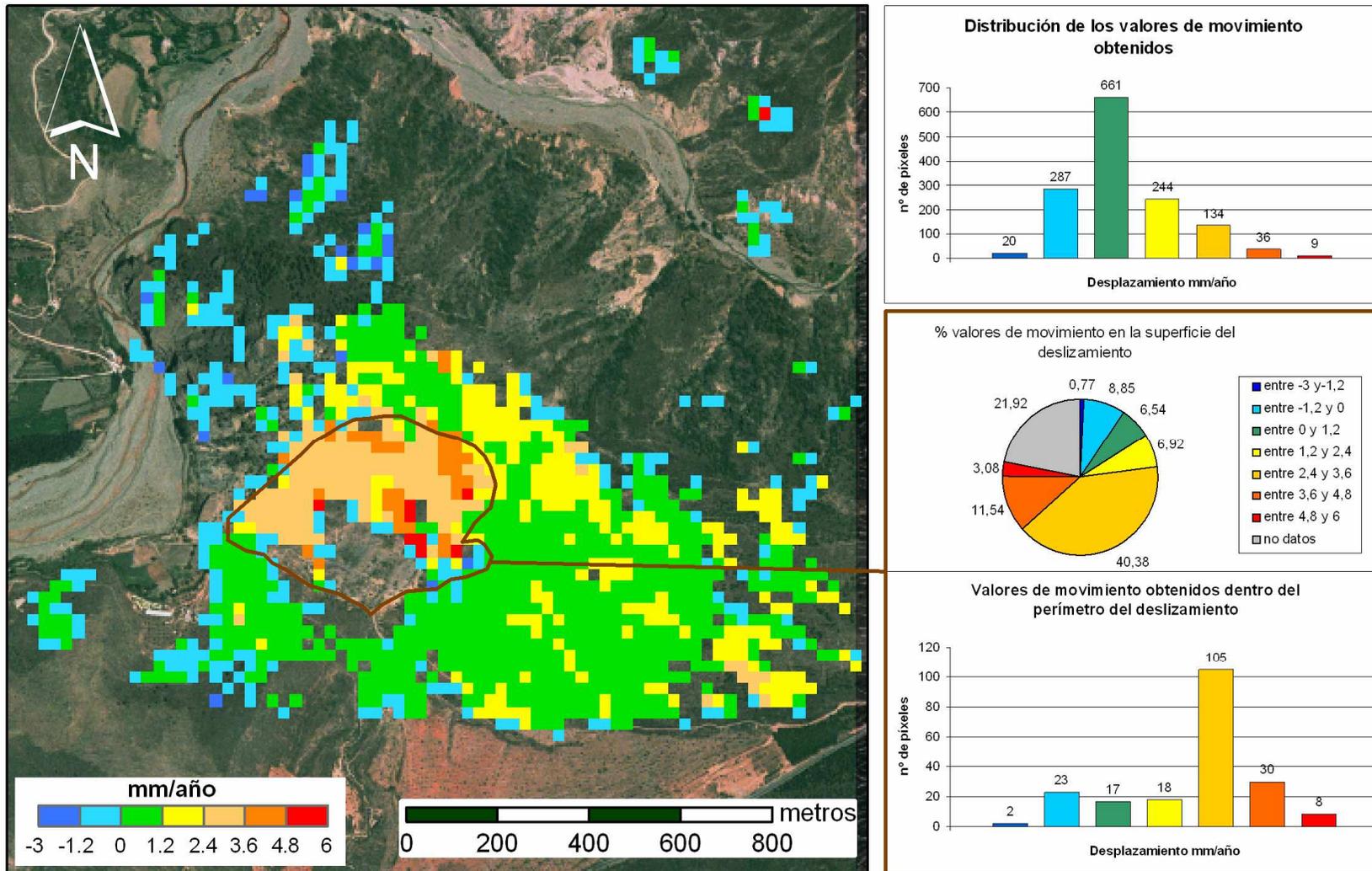


Figura 6.4: Resultados DInSAR en La Serreta de Tablones: a la izquierda los resultados de toda la zona sobre la ortofoto. La línea en color marrón oscuro delimita el perímetro del deslizamiento. A la derecha: Arriba diagrama de barras con indicación del número de píxeles obtenidos para cada clase en toda la zona. Abajo: Gráficos de los píxeles de cada clase dentro del perímetro del deslizamiento: diagrama circular con los porcentajes de píxeles de cada clase, incluyendo el % sin datos y diagrama de barras con la cantidad de píxeles de cada clase.

La relación entre los valores de movimiento LOS estimados con DInSAR y las características geológicas y topográficas del deslizamiento se muestran en la Figura 6.5. En ella se incluyen dos mapas de integración de resultados DInSAR con la geología y geomorfología de detalle de la zona del deslizamiento, y dos perfiles de la ladera que muestran los materiales que se desplazan y la superficie de rotura o plano de deslizamiento supuesto, así como la irregularidad topográfica de la superficie de la ladera. Sobre ella se dibujan los píxeles con el color correspondiente al valor de desplazamiento, con indicación de dirección y sentido, mediante una flecha de longitud proporcional a la tasa de movimiento.

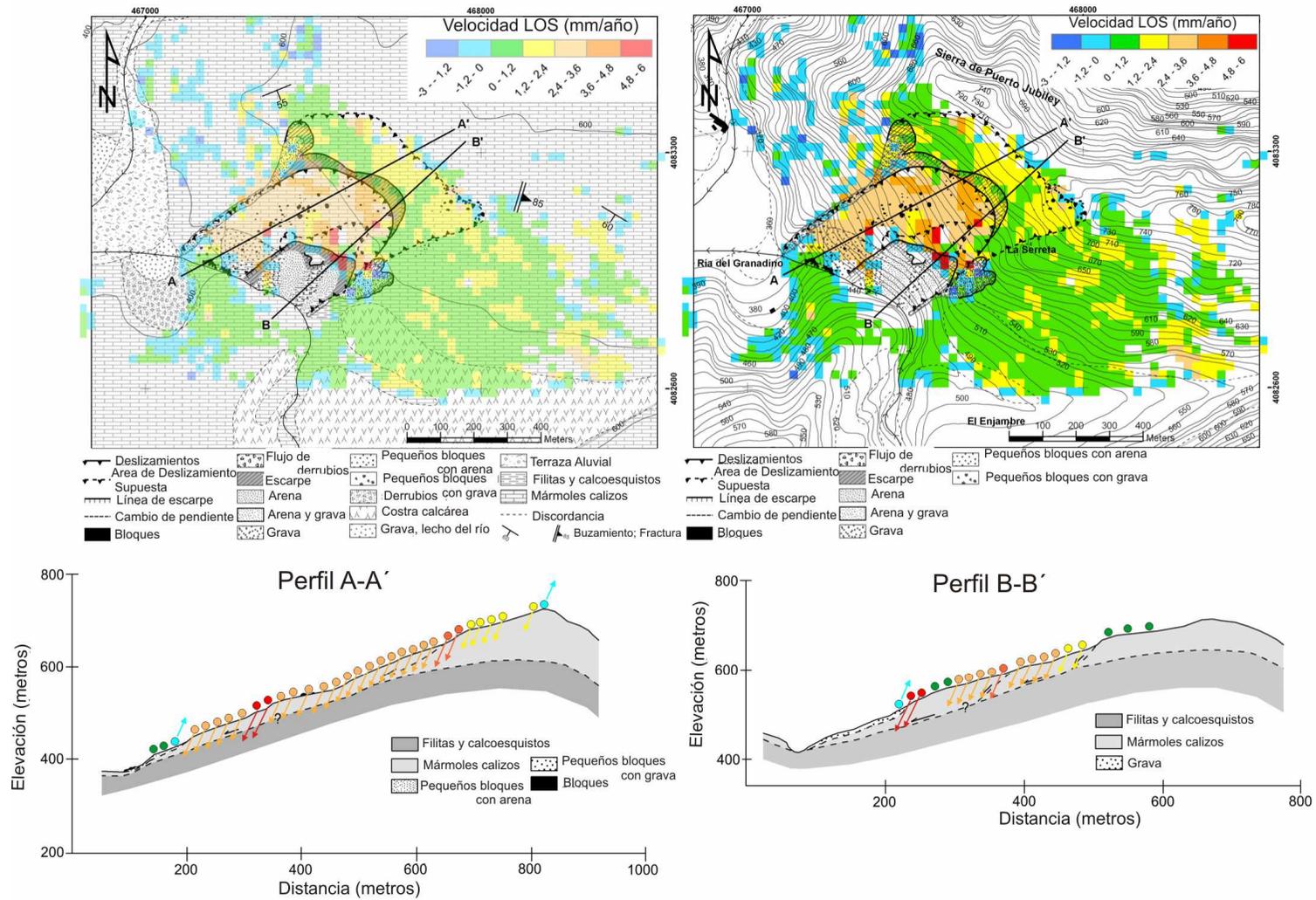


Figura 6.5: Integración de los resultados de movimiento con DInSAR con la cartografía geológica y geomorfológica de detalle y la topografía. Abajo dos perfiles del deslizamiento con representación de la litología y los valores de movimiento expresando su dirección, sentido y magnitud. (Fernandez et al. 2009)

Aunque la actividad del deslizamiento se manifieste con velocidades muy lentas, la acumulación de la deformación define cierto rango de peligrosidad. En el caso límite, la masa podría acelerar su movimiento, especialmente bajo acción sísmica o un periodo inusitado de lluvias. En tal caso la masa podría colapsar sobre el cauce, como ya ha sucedido con deslizamientos de mucho menor tamaño próximos al área de estudio como son Torvizcón y Almegíjar (Alcantara-Ayala, 1999; Thornes and Alcantara-Ayala, 1998) en 1996 y 1997 (Irigaray et al, 2000; Jiménez et al., 2005). Este colapso causaría una barrera dique que podría ocasionar una inundación aguas abajo, una vez que se rompiese bajo la presión del agua acumulada, llegando incluso a afectar al pueblo de Vélez de Benaudalla.

6.1.2.-Albuñuelas

El pueblo de Albuñuelas (2650 habitantes) está situado en la zona noroeste de la cuenca del Guadalfeo y fue destruido en el terremoto regional de 1884, y reconstruido entre 1890y 1910. Más recientemente el pueblo, sus carreteras y caminos se han visto afectados repetidamente por pequeños deslizamientos durante periodos extraordinariamente lluviosos, como el más reciente de 1996 y 1997 (Irigaray et al, 2000; Chacón et al, 1997). Un tercio del núcleo urbano, con unas 350 casas, está asentado en la base de un antiguo escarpe (Figura 6.7) donde aflora una capa de 20m de calcarenitas bioclásticas del Tortoniense debajo de arcillas y limos de oscuros a rojizos (Figura 6.6).

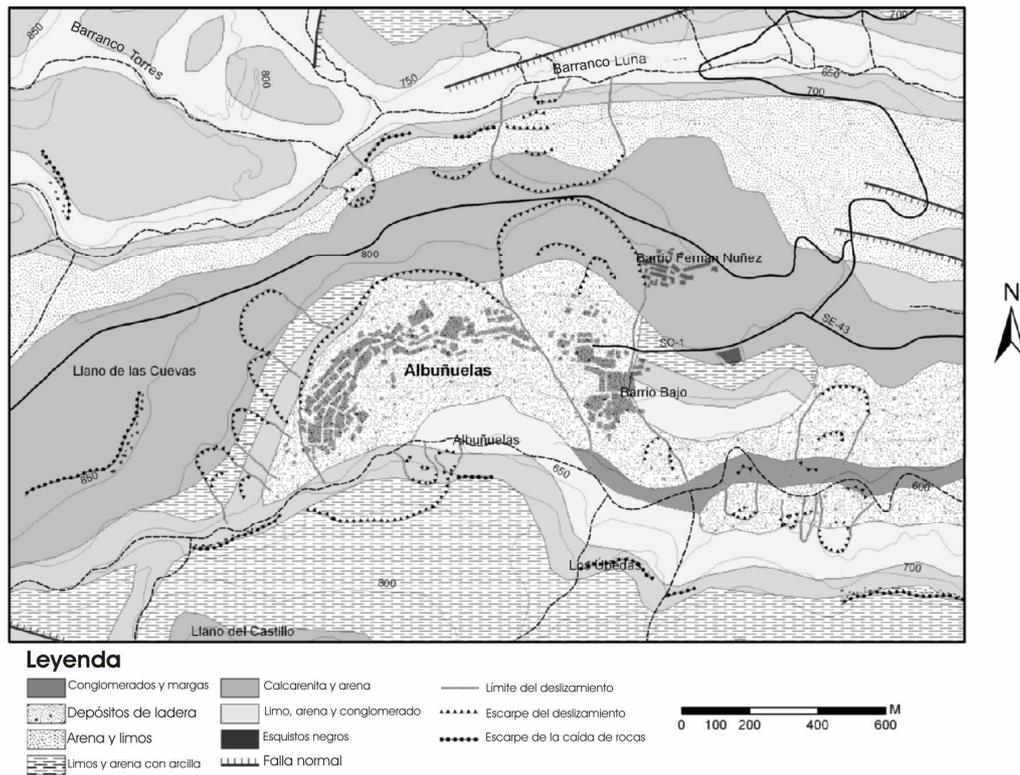


Figura 6.6: Mapa de la geología de Albuñuelas. (Modificado de Fernandez et al. 2009)

Mediante la observación directa de las viviendas se aprecia gran cantidad de casas inclinadas por todo el casco urbano (figura 6.9). Este hecho fue interpretado como evidencia de la existencia de un deslizamiento rotacional activo que afectaría a la masa de materiales rodeada por el escarpe, sobre la que se encuentra buena parte de la población. (Chacón, com. pers; Chacon et al. 1997) (Figura 6.6).



Figura 6.7: Fotografías del núcleo urbano de Albuñuelas, donde se aprecia la situación del casco urbano con respecto al escarpe.

El estudio realizado con DInSAR confirma la existencia de deformaciones del terreno, con una tasa media en las partes central y oeste del pueblo, que no se corresponden exactamente con el área rodeada por el escarpe, de 8mm/año LOS. El valor máximo

estimado es de 13mm/año, extendiéndose el área con movimiento resultante del análisis DInSAR más allá de la zona limitada por el escarpe, aunque con valores más bajos (Figura 6.8). Además el patrón de distribución de los valores de desplazamiento estimados no es paralelo al eje del hipotético deslizamiento (N80, es decir E-W aproximadamente), sino que aparecen en bandas alternantes orientadas hacia el barranco, en dirección N-S aproximadamente.

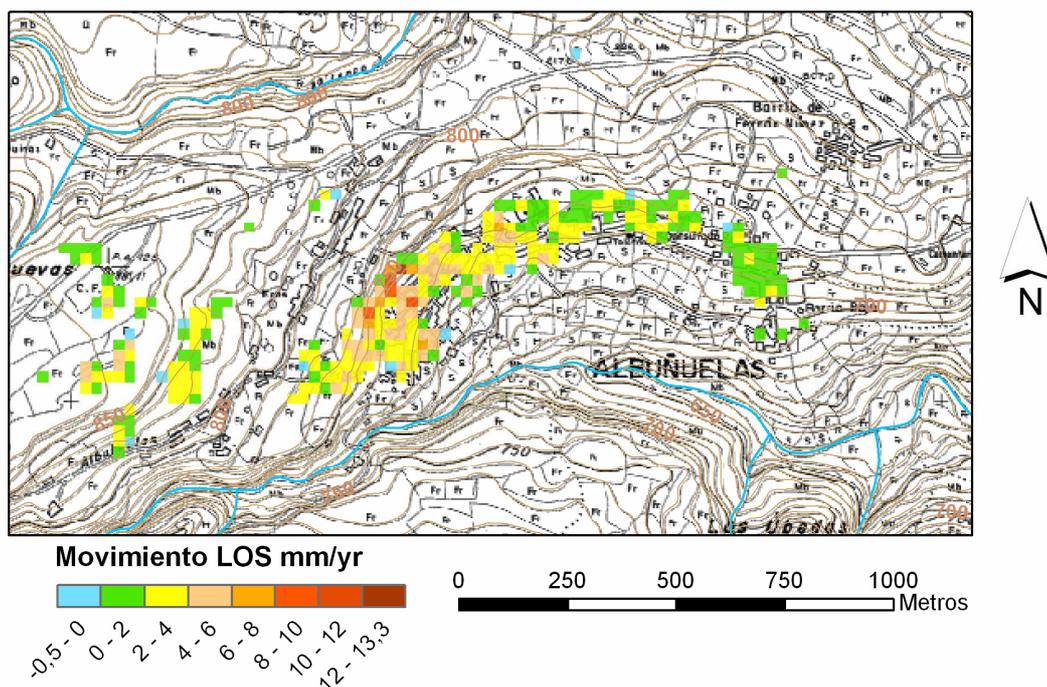


Figura 6.8: Mapa que muestra los resultados DInSAR LOS en Albuñuelas sobre la topografía de la zona. (Modificado de Fernández et al. 2009)



Figura 6.9: Fotografía de una calle del núcleo urbano de Albuñuelas con un ejemplo de inclinación de la fachada de una casa.

Dada la evidencia de deslizamientos recientes en el área, y los resultados obtenidos del tratamiento con DInSAR, se propuso al Ayuntamiento de la localidad la realización de un proyecto geotécnico detallado que se integraría en la nueva planificación urbanística de usos del suelo. Sin embargo este proyecto no se pudo realizar debido a la falta de fondos. En su defecto, el Ayuntamiento, a propuesta de Prof. Chacón, encargó un estudio alternativo consistente en la medición de la inclinación de las fachadas de las casas en las partes afectadas del pueblo y la definición de la distribución de inclinaciones en el conjunto del núcleo urbano, empleando para ello un sistema de medida de precisión (Chacón et al, 2007). Durante 5 meses se realizaron las medidas de inclinación de las fachadas de 586 de las 823 casas del pueblo, incluyendo todas las construidas antes de 1957, ya que la lentitud del movimiento requiere al menos 50 años para que la inclinación de las fachadas sea apreciable. Para la medida precisa de los ángulos de inclinación se utilizó un inclinómetro electrónico *PRO3600 Digital Protractor* de la marca Smart Tool Technologies Inc (USA) con precisión de $\pm 0.01^\circ$ entre 0 y 10° desde la horizontal y $\pm 0.1^\circ$ por encima de 10° . Como las fachadas presentan una disposición próxima a la vertical, 90° , la precisión de las medidas realizadas es de $\pm 0.1^\circ$.

El proceso de medida se realizó adosando una superficie de 40×40 cm de metacrilato al inclinómetro, para que el contacto con la pared fuese fiable y reproducible, siempre a una altura entre 160 y 170 cm. Se tomaron 5 medidas en cada una de las paredes libres, en posiciones diferentes y se asignó como inclinación de cada casa la media de las inclinaciones obtenidas. En la mayoría de los casos los valores obtenidos en una misma pared eran muy similares. Por la distribución de las calles del pueblo y el emplazamiento de las viviendas, pueden quedar libres, es decir expuestas a la calle, entre 1 y 4 fachadas, en el último caso correspondiendo a casas aisladas entre calles. La Tabla 6.1 muestra el porcentaje de casas medidas según el número de fachadas.

Número de fachadas libres por casa	Porcentaje
1	28.43
2	48.53
3	18.63
4	4.41

Tabla 6.1: proporción de casas de casco urbano medidas según el número de fachadas libres

Los ángulos de inclinación promedio de cada fachada se incorporaron y analizaron en un Sistema de Información Geográfica (SIG), expresados como: cantidad de inclinación, dirección de la inclinación y tasa media de inclinación, calculada dividiendo el ángulo de inclinación entre el número de años de antigüedad de la casa considerada (Figura 6.10). Los valores de inclinación de las fachadas están comprendidos entre 0 y 6°. Los resultados obtenidos (Figura 6.10) mostraron un patrón completamente distinto al correspondiente a la hipótesis de partida. En efecto, un deslizamiento rotacional bajo el escarpe delimitado en el sector central del casco urbano hubiese determinado la inclinación o rotación de las viviendas de acuerdo con un eje aproximadamente E-W subparalelo a la línea que contiene los extremos del escarpe, y con valores y sentido de la rotación diferentes según la distancia al escarpe. Por el contrario la distribución de las inclinaciones sigue un patrón transversal al eje y paralelo a la línea de pendiente de las vertientes a ambos lados del pueblo (Figura 6.10 A, B, C). Parecen alinearse de acuerdo con las líneas de filtración o escorrentía del drenaje, subterráneo (Figura 6.10 B, D) bajo el casco urbano o superficial a ambos lados del mismo, y manifiestan valores mayores en ciertos puntos (Figura 6.10 C, D) cuyos emplazamientos no se justifican a partir de las de las observaciones realizadas en la superficie del terreno. Se descartó la hipótesis de que las inclinaciones estuvieran relacionadas con el deslizamiento rotacional al establecer como cierto las siguientes afirmaciones (Chacón et al. 2007):

1. Las casas inclinadas se extienden más allá de la zona limitada por el escarpe, incluyendo casas que están lejos del mismo.
2. Las casas inclinadas se presentan alrededor de los bordes de la ladera sur del pueblo o mostrando tendencia lineal perpendiculares a la ladera sur.
3. Existe coincidencia entre la tendencia de barrancos menores y las líneas de drenaje en la zona sur de la ladera y la alineación de las casa inclinadas.

En consecuencia se propuso otra hipótesis en la que los vuelcos diferenciales de las viviendas están relacionados con la infiltración de agua a lo largo de canales antiguos cubiertos, que están afectando a depósitos no consolidados, que se prepararon de forma rápida para la reconstrucción del pueblo tras el terremoto de Andalucía de 1884.

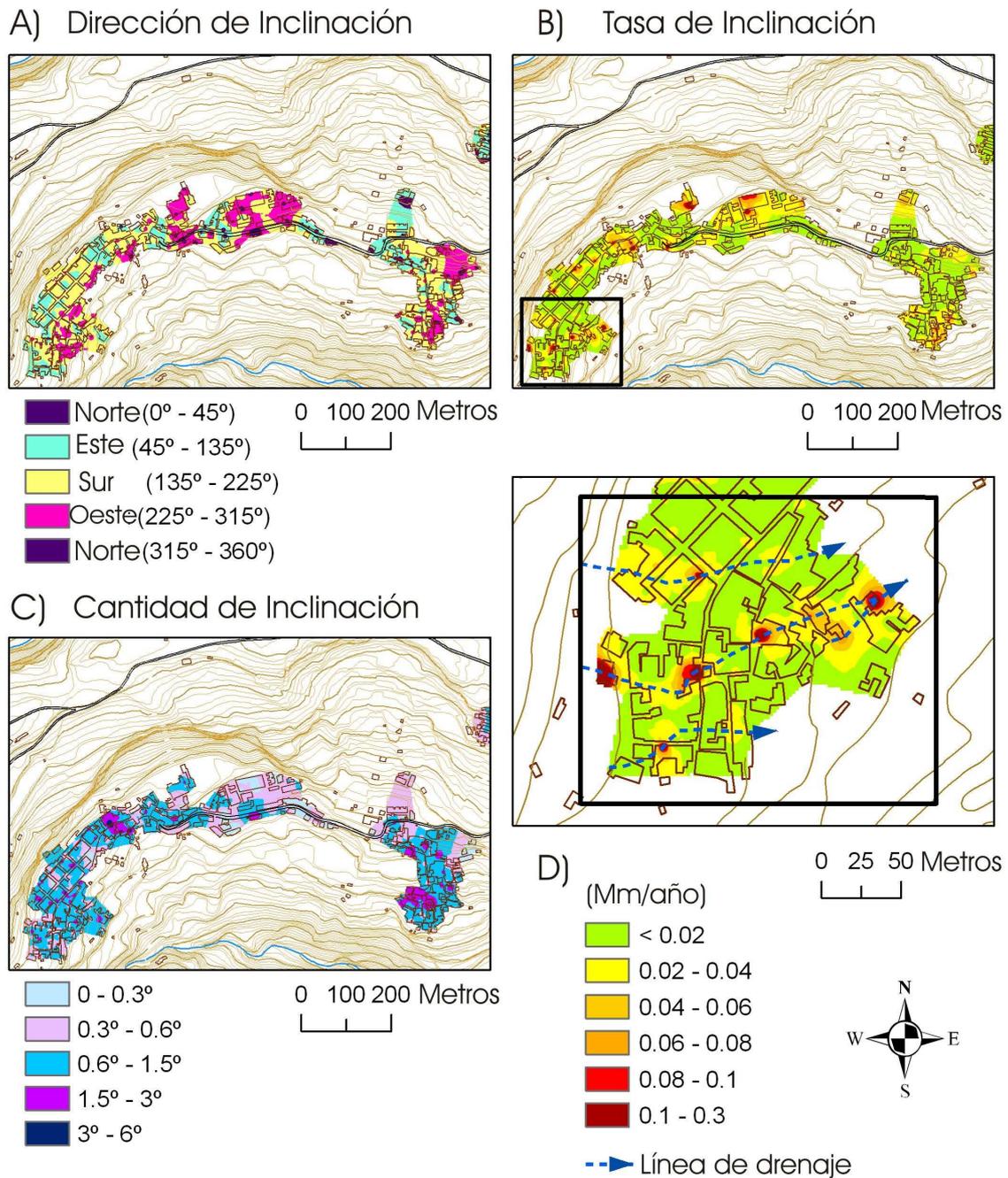


Figura 6.10: Mapas de Inclinación de las casas de Albuñuelas: A: Direcciones de inclinación. B: tasa de inclinación. C: cantidad de inclinación. D: Detalle de la coincidencia entre las líneas de drenaje y las zonas con mayor tasa de inclinación en la zona Oeste de núcleo urbano. (Modificado de Fernandez et al. 2009)

En el momento de interpretar los resultados DInSAR, se carecía de sondeos o muestras de sedimentos bajo el núcleo urbano que permitiesen la interpretación de las inclinaciones o vuelcos de las casas como resultante de asientos diferenciales por consolidación de sedimentos mal compactados existentes bajo los cimientos (Chacón et al. 2007). Durante el pasado mes de Junio de 2009, se ha realizado un sondeo en un

punto significativo en el extremo este del pueblo que ha determinado la presencia de un potente horizonte de arcillas plásticas a menos de 8m de profundidad, y un nivel freático muy somero que confirma la hipótesis de asiento diferencial. En la actualidad se prosiguen las investigaciones, que serán publicadas en fechas próximas.

6.1.3.-Casos no concluyentes

Dentro de estos casos se han incluido aquellas zonas de la Cuenca del Río Guadalfeo en las que no han podido obtener resultados en la Fase DInSAR, como se comentó en el apartado 5.2.3, además de uno de los casos en el que se han obtenido resultados DInSAR, el Barranco de Mezquerina (Zona 5), pero en el que su interpretación no ha sido claramente justificable por los hechos observados (Tabla 6.2).

ZONA	CASOS NO CONCLUYENTES			
	CON RESULTADOS FASE DInSAR	SIN RESULTADOS FASE DInSAR		
		Orientación N-S	Pérdida coherencia	Sin zona estable
1			X	
2			X	
3			X	
4			X	
5	X			
6			X	
7		X		
9			X	
10				X
11			X	
14		X		

Tabla 6.2: Clasificación de los casos de estudio no concluyentes en la Cuenca del Río Guadalfeo.

Los casos correspondientes de su estudio no viable debido a la orientación N-S de las laderas implicadas (zonas 7 y 14), fueron detectados en la fase PRE DInSAR (apartado 5.1.2), por lo que no se pudo realizar su estudio con las imágenes disponibles. Para que pudiesen estudiarse con DInSAR tendría que recurrirse a imágenes de satélites que no tengan órbita polar, cuya trayectoria no fuese próxima a la dirección N-S. Esto en la

actualidad no es posible, por lo que se tendrá que recurrir a otro tipo de técnicas para su estudio.

En los casos no concluyentes por no tener resultados en la Fase Específica DInSAR, debido a la pérdida de coherencia (zonas 1, 2, 3, 4, 6, 9 y 11) el número de píxeles obtenido tras procesado DInSAR ha sido muy bajo y su distribución muy dispersa. En esta situación ha influido también el hecho de que no existan elementos invariables en el tiempo, como pueden ser edificaciones u otros tipos de construcciones artificiales. Antes de descartar su estudio con DInSAR se propondría su análisis con la técnica DInSAR en fechas posteriores o, en aquellas en las que se establezca un interés especial, la disposición de reflectores artificiales para poder abordar su estudio en fechas futuras. Esta última medida incrementa notablemente el coste del estudio DInSAR y tendría que ser valorada económicamente de forma absoluta y en comparación con el empleo de otras técnicas de instrumentación “in situ”.

La zona 10, situada sobre el casco urbano de Torvizcón es el último de los casos en los que no se han obtenido resultados en la Fase DInSAR. En esta ocasión ha resultado imposible establecer una zona sin desplazamiento, ya que casi todos los píxeles obtenidos en la Fases Específica del procesado (apartado 4.2.2) se encuentran dentro de la masa del deslizamiento (Figura 6.11). Los escasos píxeles externos al perímetro del deslizamiento no ofrecen suficiente confianza para ser considerados como referencias estables. En este caso se podría realizar un estudio de fechas posteriores con objeto comprobar si la situación se mantiene, en cuyo caso se podría plantear el establecimiento de reflectores artificiales o su estudio con técnicas “in situ”, valorando el coste económico de las posibles opciones, como se ha comentado en los casos anteriores. Las revisiones de estos casos con imágenes RADAR de fechas posteriores se han incorporado a las actividades de investigación propuestas en las líneas de futuro que se exponen en el Capítulo 8.

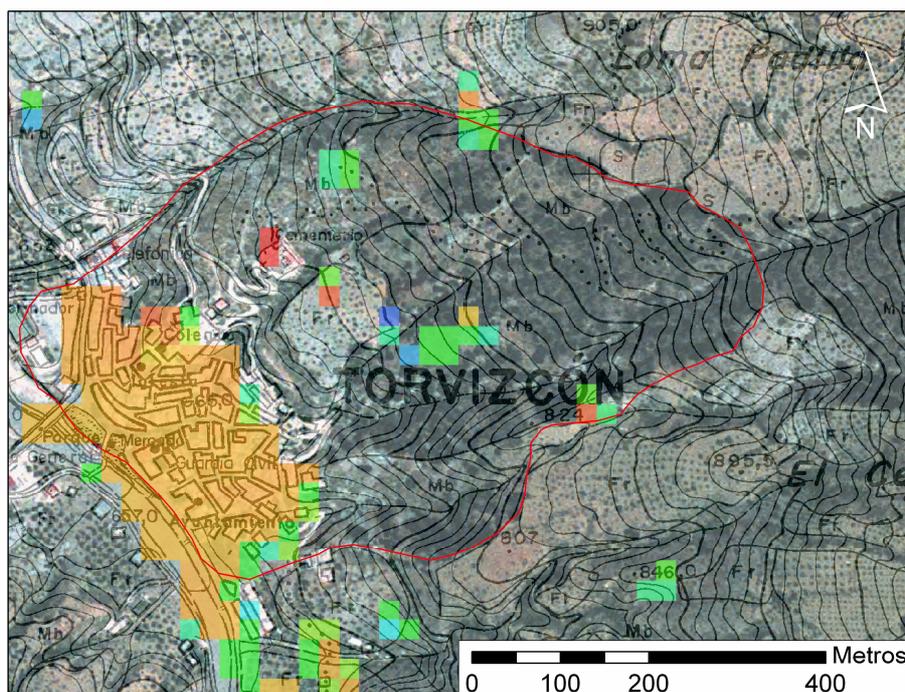


Figura 6.11: píxeles obtenidos en la zona 10 en Torvizcón. Los colores no reflejan tasa de velocidad, ya que no se ha podido establecer una zona estable. En rojo aparece marcado el perímetro del deslizamiento.

Barranco de Mezquerina

Este caso se ha incluido dentro de los casos no concluyentes, debido a la dificultad de interpretación de los resultados obtenidos, como se verá a continuación.

El Barranco de Mezquerina, cercano al núcleo urbano de Lanjarón, es una zona en la que el reconocimiento de las formas del relieve indicó la presencia de evidencias de inestabilidad de vertientes. Las evidencias se refieren al aspecto deformado de la ladera, la aparición de escarpes y grietas abiertas, la observación de abundantes bloques caídos de mármoles y la ausencia de jerarquía morfológica en la red de drenaje (Figura 6.12). Todo ello fue interpretado como indicativo de un deslizamiento antiguo dormido (El Hamdouni, 2001), (Figura 6.13).



Figura 6.12: Fotografía frontal del barranco de Mezquerina.

Los materiales afectados son micaesquistos y mármoles, además de calizas Triásicas y láminas intercaladas de yesos (Figura 6.13).

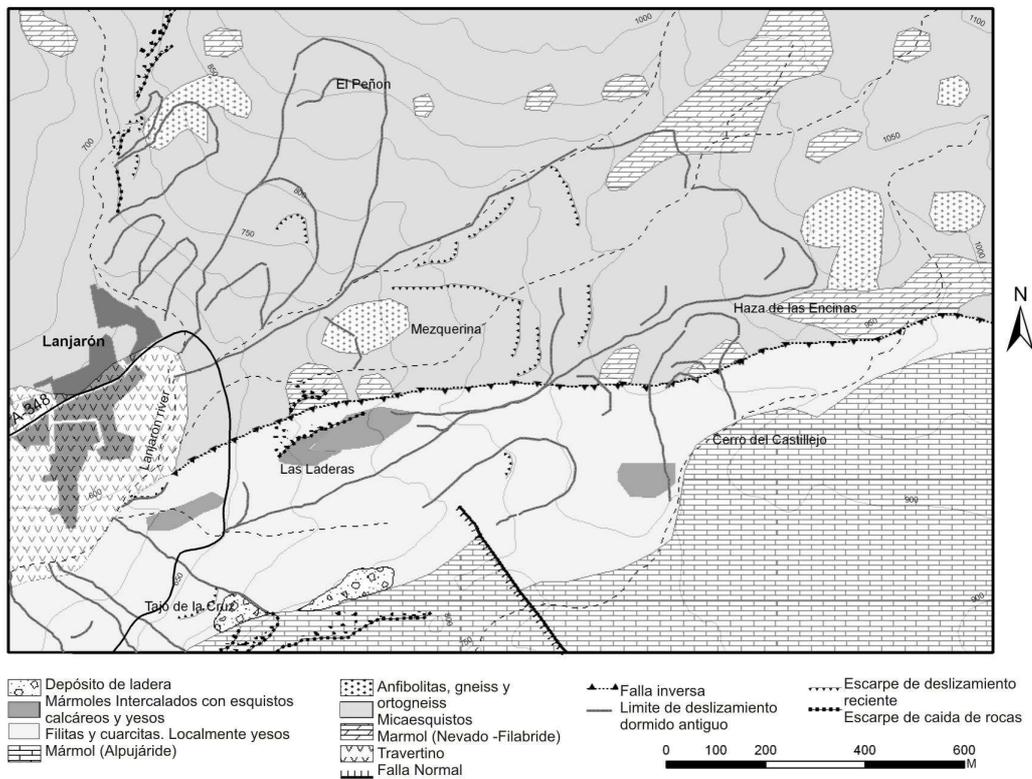


Figura 6.13: Geología de detalle del Barranco de Mezquerina (Lanjarón). (El Hamdouni, 2001)

Los resultados obtenidos mediante DInSAR indican tasas de deformación 7.2 mm/año LOS, en una pequeña zona cercana a la carretera principal, que corresponde a velocidad de movimiento extremadamente lenta (Cruden and Varnes, 1996). Durante el periodo de unos 7 años del estudio DInSAR realizado, esto supone un desplazamiento acumulado de unos 5 cm. (Figura 6.14).

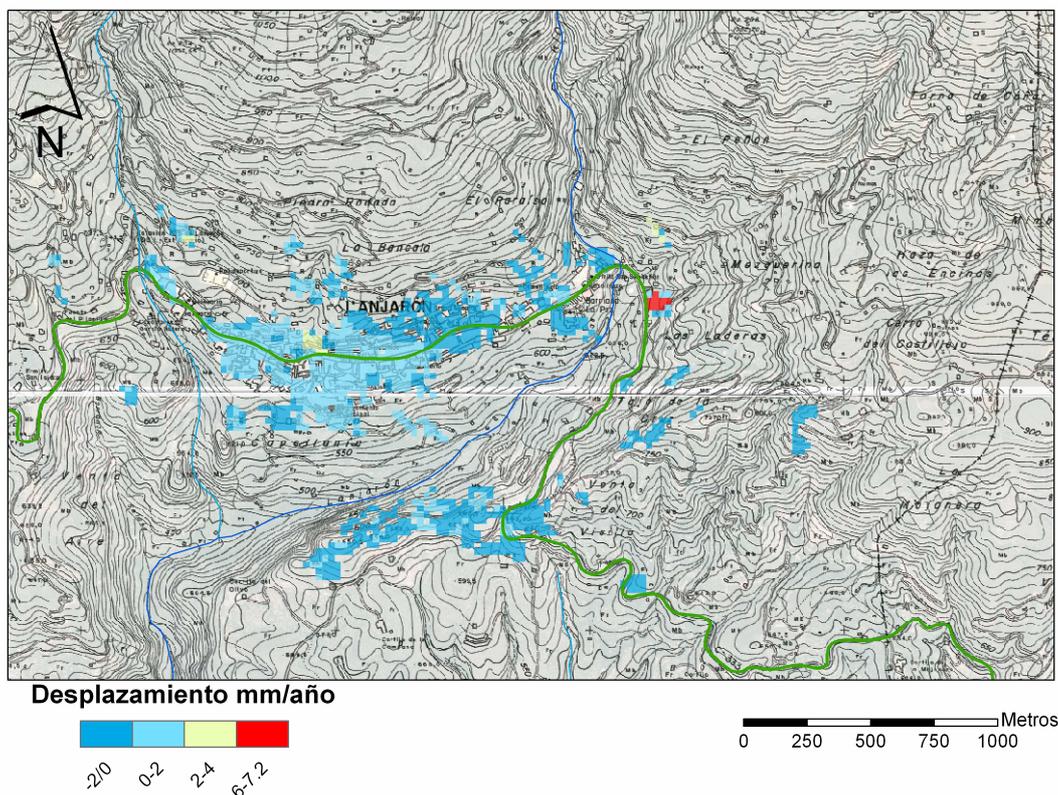


Figura 6.14: El Barranco de Mezquerina (Lanjarón, Granada). Mapa de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la Metodología con la técnica DInSAR, representados sobre información topográfica de la zona, incluyendo las carreteras en verde y la red hidrográfica en azul. Los píxeles rojos corresponden al máximo valor de movimiento LOS: 7.2mm/año.

Los valores de deformación obtenidos se podrían deber a un deslizamiento o a subsidencia de la zona por disolución kárstica de los yesos, o a una combinación de ambos procesos.

En la zona existen algunas construcciones aisladas, que han sido examinadas, sin éxito, en busca de evidencias actuales de la deformación del terreno. También se ha consultado a la Dirección General de Carreteras de la Provincia de Granada sobre la posible realización de obras de acondicionamiento y mejora en el tramo de la carretera que atraviesa la ladera afectada de movimiento y por lo tanto, con la tasa de deformación estimada, debiera haber sido dañada. Sin embargo no se han registrado

reparaciones en el periodo de estudio. Por lo tanto, la ausencia de evidencias de daños, en las construcciones y en el tramo de la carretera, recientemente o en los últimos 20 años, han cuestionado la propia actividad del deslizamiento identificado mediante criterios geomorfológicos en la ladera del barranco, y considerar que las tasas de deformación pudieran estar relacionadas con un proceso de subsidencia muy local por karstificación de yesos. Estos yesos aparecen como capas irregulares o cuerpos entre filitas o mármoles triásicos alpujárides microfracturados, siendo afectados por varios procesos de disolución (Cardenal et al., 1994). La disolución se produce en acuíferos en condiciones climáticas de tipo semiárido, con recargas relativamente altas en zonas montañosas, bajo un régimen de flujo de agua subterránea predominantemente difuso y con formas kársticas poco desarrolladas. Sin embargo la cantidad de yesos presentes en esta ladera se limita a pequeñas láminas discontinuas y gránulos dispersos de poco espesor, por lo que la explicación al movimiento detectado con DInSAR no se justifica claramente con ninguno de los procesos mencionados, por lo que se deberá proseguir la investigación a partir de nuevos datos DInSAR del periodo posterior.

6.3. GRANADA- ÁREA METROPOLITANA

El análisis DInSAR se completó analizando los pueblos del área metropolitana y la ciudad de Granada, de forma independiente y ensamblando el conjunto en una única zona. Para ello se realizaron 45 procesados de la primera etapa de la fase específica del análisis DInSAR, usando orlas de ancho variable alrededor de cada uno de los núcleos de población seleccionados. Los resultados de la primera etapa de la fase específica del análisis DInSAR, se combinaron realizando varios procesos de reordenación de las zonas de forma conjunta, hasta conseguir un único mapa resultante que incluyese toda el área.

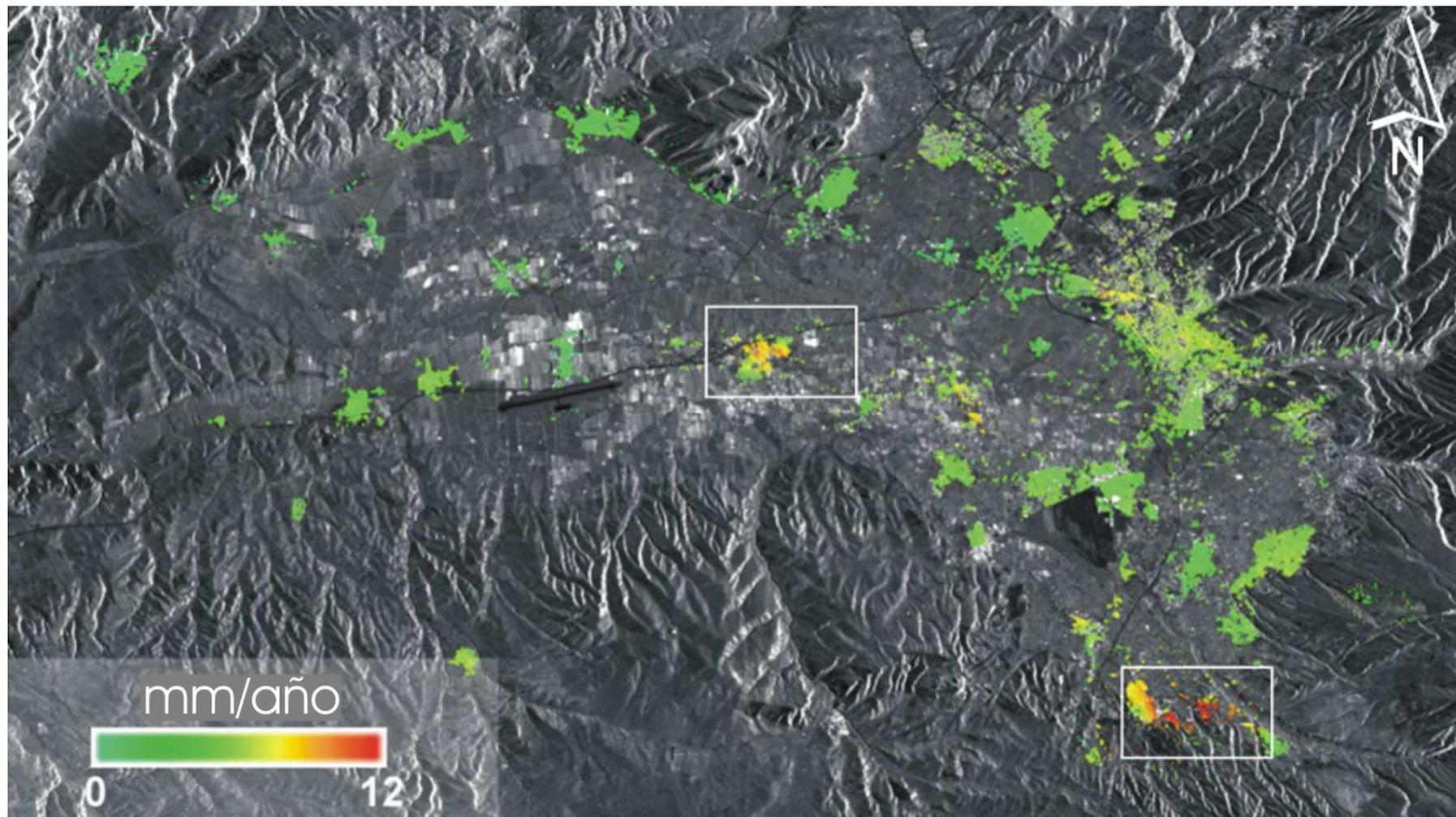


Figura 6.15: Distribución del movimiento del terreno en el área metropolitana de Granada resultante del análisis DInSAR, representado sobre la imagen Media de Amplitud.. Se han identificado dos zonas, rodeadas con rectángulos en color blanco, en el centro de Santa Fe y en el sureste de Otura. La correspondencia con los valores de movimiento se muestra en la barra de la izquierda en valores de milímetros al año. (Fernandez et al. 2009)

Debido a la ausencia de datos previos sobre la existencia de subsidencias activas en el área, la técnica DInSAR se ha utilizado en este caso como herramienta de detección precoz para la identificación de áreas afectadas por movimientos y para la cuantificación de los procesos observados. Los movimientos detectados se concentran alrededor de dos núcleos urbanos diferentes. Estos corresponden a las zonas urbanas de los municipios de Santa Fe en el Oeste y Otura en el Sur (Figura 6.15).

6.2.1.- Santa Fe

Uno de esos núcleos es el pueblo de Santa Fe, de 14600 habitantes, asentado sobre depósitos aluviales del Holoceno (Figura 6.16).

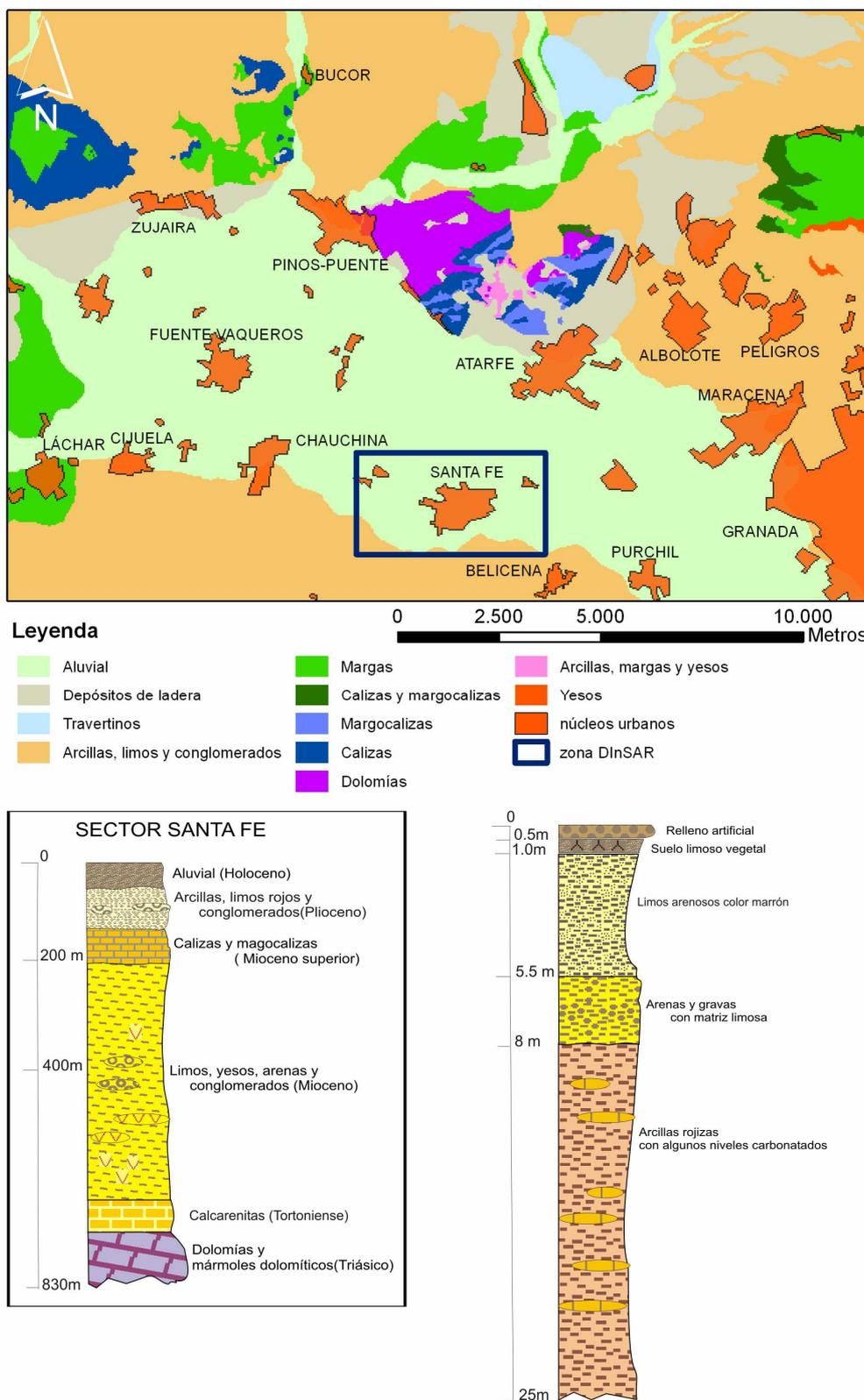


Figura 6.16: Información litológica del entorno de Santa Fe. Arriba: Mapa de unidades litológicas. Abajo a la izquierda: columna litológica general de Santa Fe. Fuente IGME 1988; abajo a la derecha: columna litológica local de la zona urbana de Santa Fe correspondiente a los 25 primeros metros de profundidad elaborada a partir de la información procedente de sondeos. (Modificado de Fernandez et al. 2009)

Las tasas de deformación LOS obtenidas alcanzan los 8 mm/año, lo que supone una deformación acumulada de 5.6 cm en todo el periodo. Los valores máximos se presentan en el centro histórico del pueblo localizado en el noroeste del núcleo urbano, decreciendo hacia las afueras con una distribución casi concéntrica, hasta llegar a valores nulos fuera del núcleo urbano. (Figura 6.17).

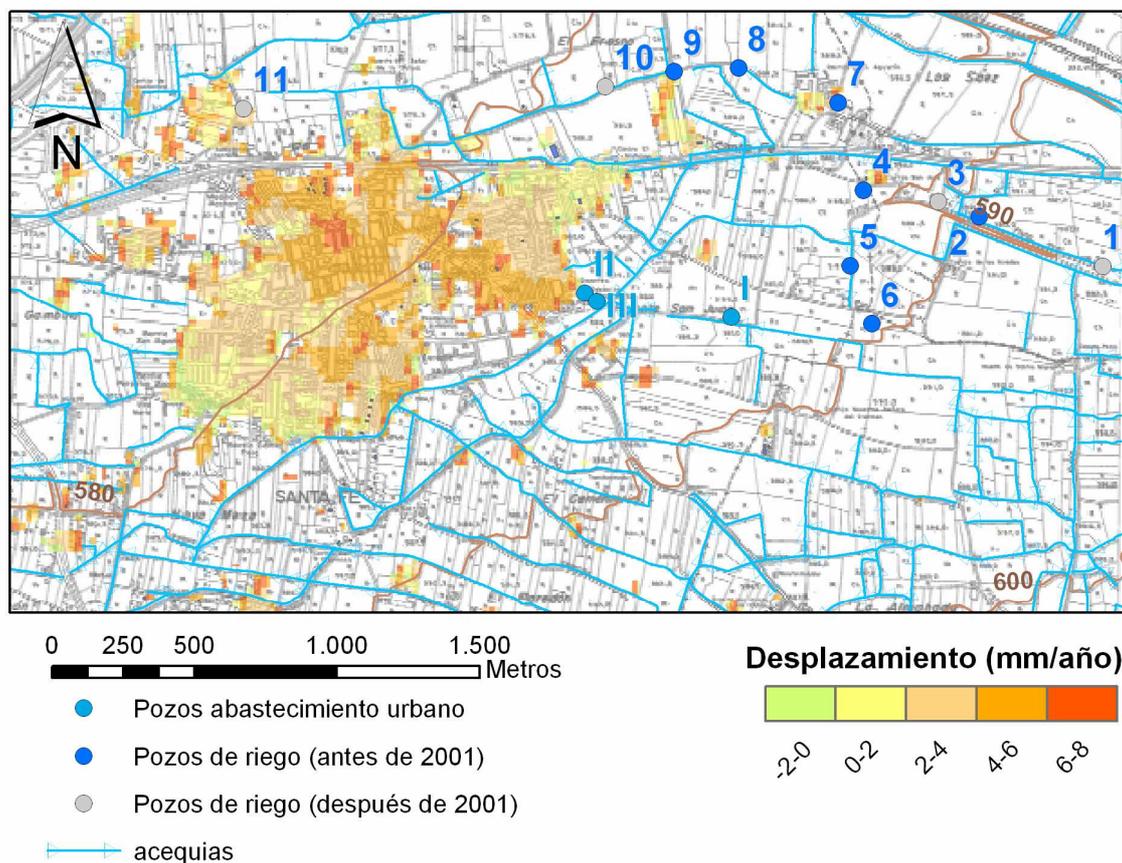


Figura 6.17: Mapa de detalle de la zona de Santa Fe, una de las dos zonas del Área Metropolitana en la que se ha encontrado valores de subsidencia. Se muestran los valores de movimiento de hasta 8mm/año, la distribución de los pozos de abastecimiento urbano y de regadío y la red de acequias que rodea al núcleo urbano. (Modificado de Fernández et al. 2009)

En este caso, el único proceso que puede estar relacionado con el movimiento detectado es la explotación intensiva del acuífero, asociado al riego de cultivos y al abastecimiento urbano. En la figura 6.17 se representa la tasa de desplazamiento estimada con DInSAR, integrado con la información topográfica, además de la localización de los pozos correspondientes al riego y al abastecimiento urbano y la red de acequias. Los pozos perforados antes de 2001 están representados en color azul y los posteriores en gris. Hay 7 pozos dedicados al riego de cultivos representados en color azul oscuro. De ellos los números 5 y 6 son los más antiguos y fueron perforados en 1986. Sus profundidades son 80 y 90m y de ellos se extrae un caudal de 100 y 50l/s respectivamente.

Los pozos 8 y 9 datan de 1990, tienen una profundidad de 100m y un caudal de extracción de 100l/s. Los pozos 4 y 7 son pozos antiguos reperforados en 1993-4 a una profundidad de 60m y con una extracción de 50l/s. Finalmente el pozo número 2 se perforó en 1997 a una profundidad de 95m y de él se extraen 100l/s. Los tres pozos de abastecimiento urbano se representan en azul claro en el mapa. El pozo I es el más reciente y tiene una profundidad de 100m y un caudal de extracción de 100l/s. Los pozos II y III tienen una profundidad de 65m y de ellos se extraen 30l/s.

Además de estos pozos, había un número desconocido de pozos domésticos incontrolados, repartidos por todo el núcleo urbano, particularmente cerca de la mayoría de las casas de la parte antigua o incluso dentro de ellas, en el patio. El sistema de abastecimiento urbano municipal data de mitad de los años setenta, hace unos 40 años, pero hasta entonces el abastecimiento doméstico de agua se basaba en pozos tradicionales, con extracciones pequeñas de unos cuantos l/s. En las últimas décadas estos pozos domésticos se han ido abandonando y clausurando progresivamente, pero en mitad de los años 90 aun existían un número indeterminado de pozos activos. Como consecuencia del suministro de agua por bombeo, los depósitos aluviales de esta área se han ido consolidando bajo el descenso del nivel freático. Los efectos del proceso de consolidación se aprecian en la zona urbana de Santa Fe, con un progresivo incremento del asentamiento del suelo en la zona central del área cargada, ocupada por la parte más antigua del casco histórico, y disminuyendo hacia los alrededores ocupados por las zonas de desarrollo urbano más recientes. El asentamiento progresivo está afectando al centro del pueblo, donde las casas tienen una cimentación muy escasa o incluso carecen de ella, y han sido muy vulnerables a las deformaciones del terreno. Prueba de ello son los daños que se observan en la práctica totalidad de las calles, en muros y fachadas de viviendas en la zona afectada (Figura 6.18).



Figura 6.18: Daños en viviendas del centro del casco urbano de Santa Fe.

En la figura 6.19 se muestran dos fotografías aéreas en las que se delimita el perímetro urbano de Santa Fe. A la izquierda, en el año 1957, y a la derecha en el 2000.

En el perímetro de 1957, la línea discontinua roja define el área de subsidencia estimado con DInSAR, con valores de movimiento de entre 4 y 8 mm/año. La zona del casco histórico antiguo está totalmente incluida en esta zona y muestra los valores más altos de movimiento subsidente (figura 6.15).

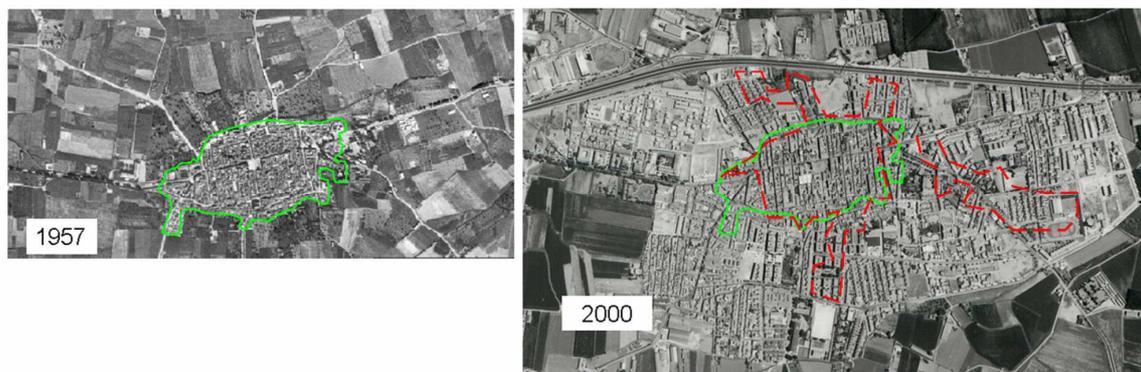


Figura 6.19: fotografías aéreas de la zona urbana de Santa Fe. A la izquierda, vista vertical en 1957 y a la derecha en el año 2000. La línea verde define el perímetro del casco histórico antiguo del pueblo y la línea roja discontinua las zonas de subsidencia estimadas con DInSAR, con valores de deformación de 4 a 8 mm/año. (Fernandez et al. 2009).

6.2.2- Otura

La segunda zona corresponde con el municipio de Otura, de 4578 habitantes, donde afloran conglomerados, arenas y margas del Pleistoceno Superior al Tortonense Superior (Braga et al, 1990, Reicherter and Peters, 1990; Figura 6.20). Las tasas de deformación estimadas con DInSAR alcanzan los 12mm/año lo que equivale a 8.4 cm en el periodo 1993-2000 (Figura 6.21).

La zona de subsidencia cubre una extensión que incluye la zona urbana de Otura en su práctica totalidad. Las tasas de deformación son mayores en las nuevas áreas urbanas, que se extienden principalmente hacia el este (figura 6.22), con velocidades que van desde los 2 mm/año a los 12 mm/año. En el centro histórico del municipio los valores son más bajos y están comprendidos entre 2 y 4 mm/año. En el norte, oeste y sureste, coincidiendo con los municipios de los alrededores, encontramos tasas de subsidencia de hasta 2 mm/año (muy próximos a la precisión del método) o nulo, por lo que se corresponden con áreas no afectadas por las deformaciones del terreno analizadas.

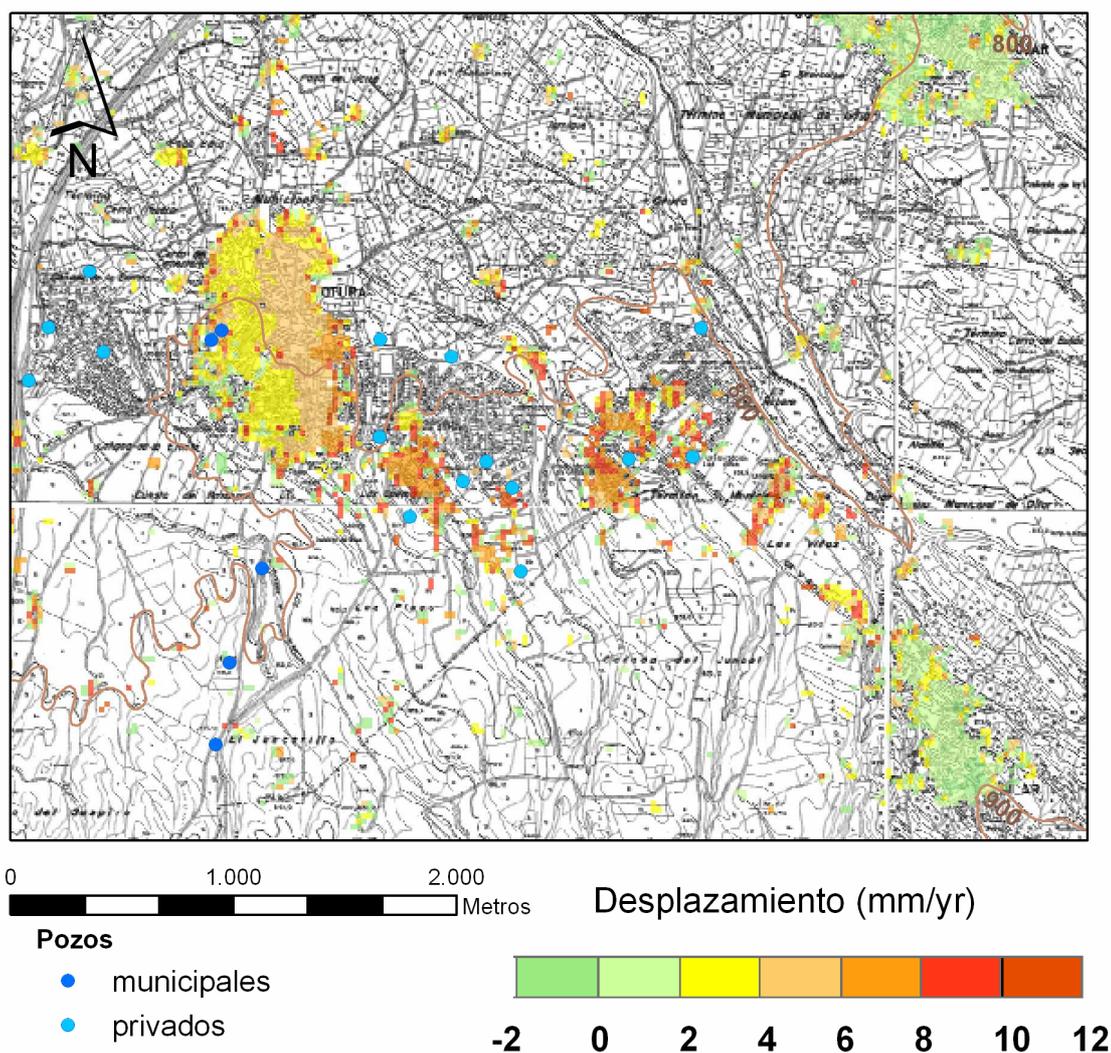


Figura 6.20: Mapa del pueblo de Otura integrando información topográfica y de distribución de pozos de abastecimiento urbano con valores de subsidencia del terreno estimado con DInSAR. La velocidad máxima alcanza los 12mm/año. (Modificado de Fernández et al. 2009)

Desde finales de los años setenta, como resultado del rápido crecimiento urbano han surgido en el municipio 19 urbanizaciones y su abastecimiento de agua proviene únicamente de 23 pozos de extracción con profundidades de entre 100 y 200 metros y con caudales de extracción de 2 a 20 l/s. Los detalles sobre las unidades litológicas que afloran en esta zona y los cambios en el uso del suelo de los últimos 30 años se representan en los mapas de la Figuras 6.21, 6.22 y 6.23.

A diferencia de los que ocurre en Santa Fe, las viviendas de las zonas subsidentes no muestran daños. En realidad se trata aquí de urbanizaciones de viviendas unifamiliares construidas, en su mayor parte, a partir de mediados de los años 80 y en un periodo de tiempo muy corto, ya que la construcción de edificaciones se fue ralentizando a partir de mediados de los años 90. Las características constructivas de las nuevas edificaciones

incorporan elementos estructurales y técnicas de cimentación mucho más resistentes que las viviendas de Santa Fe, mucho más antiguas. Las viviendas están dotadas de estructuras de hormigón armado y son predominantes las viviendas con cimentación en losa frente a las dotadas de zapatas con zunchos. Tales estructuras de cimentación reparten las deformaciones inducidas por la subsidencia que se caracterizan por su lentitud (2 a 12 mm/año) y una distribución en una zona amplia relativamente homogénea que excluye efectos diferenciales. La relativa homogeneidad de la deformación en la distribución espacial se traduce en la ausencia de evidencias de daños en el momento actual del proceso. Queda por establecer si la evolución posterior al estudio ha mostrado el mismo gradiente de deformación.

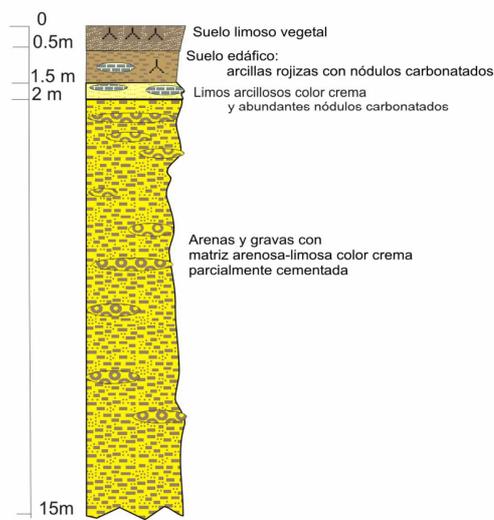
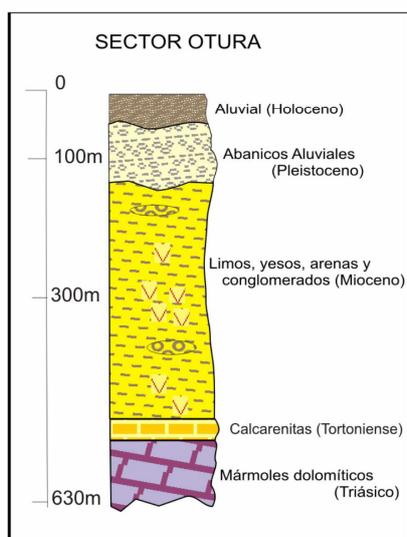
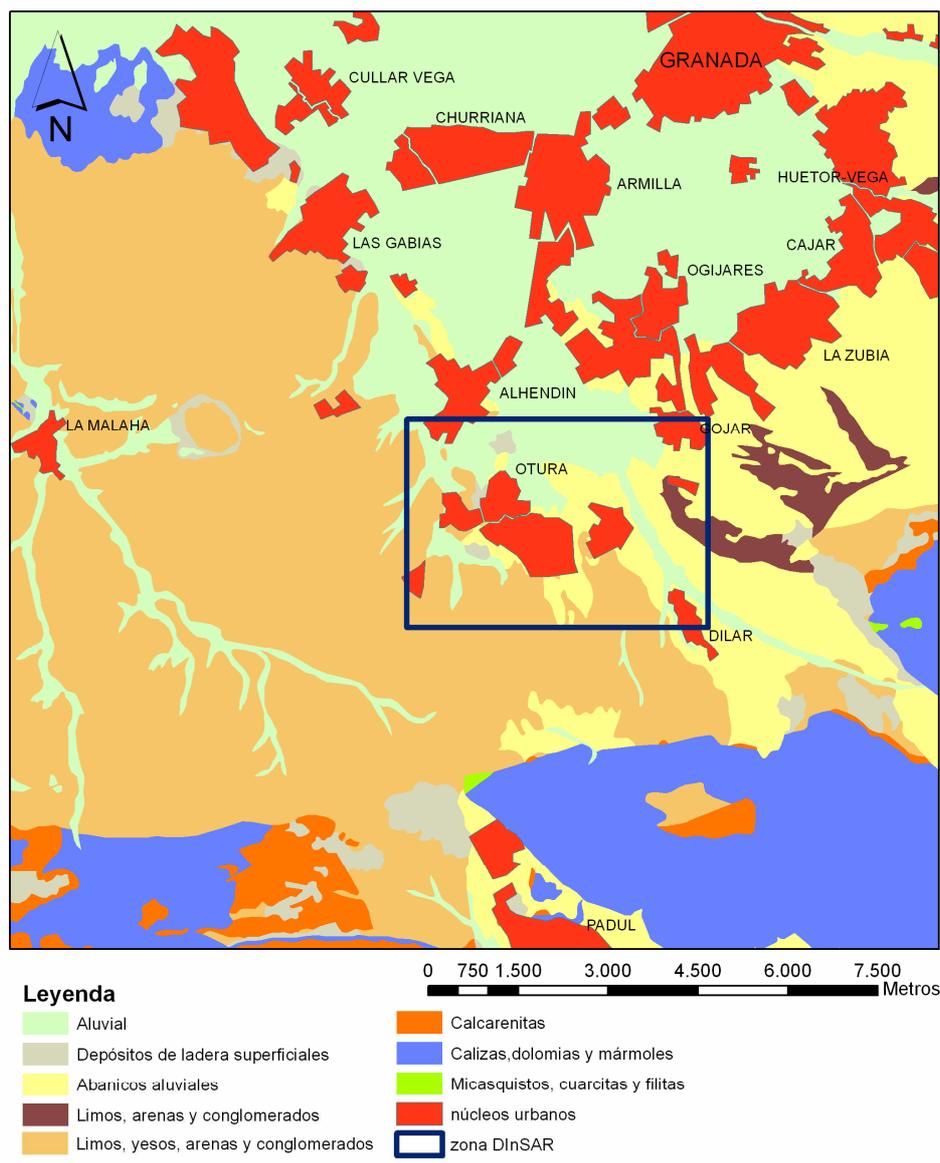


Figura 6.21: Información litológica de la zona de Otura. Arriba: Mapa de las unidades Litológicas. Abajo, a la izquierda: columna litológica general de la zona. (Fuente: IGME, 1980). Abajo, a la derecha: columna litológica de la zona urbana en expansión de Otura de los 15 primeros metros, elaborada a partir de la información de sondeos y ensayos de penetración. (Modificado de Fernandez et al. 2009).



Figura 6.22: Dos fotografías aéreas del núcleo urbano y alrededores de Otura. A la izquierda tejido urbano existente en 1977. A la derecha en 2001. Con una línea verde se engloba el perímetro urbano de los años 70 y en amarillo la zona urbana desarrollada a partir de finales de los 80. La línea roja discontinua en la imagen de la derecha representa la zona afectada por subsidencia del terreno estimadas con la técnica DInSAR. Se aprecia claramente una gran coincidencia entre la zona de crecimiento urbano y la zona afectada de movimiento. (Fernandez et al. 2009)

Una hipótesis que explica el proceso de subsidencias estimado con DInSAR, en la zona de Otura está relacionada con la tectónica activa de las fallas locales existentes alrededor del borde de la cuenca de Granada (figura 6.23).

Sin embargo, las tasas de subsidencia encontradas son demasiado altas para estar asociadas a este tipo de actividad, como se muestra en los ejemplos estudios que aparecen en el Anexo 2 y en la Figura 6.24, donde se comparan datos de desplazamientos verticales publicados en estudios de tectónica activa y subsidencias asociadas con extracción de agua. A partir de estos datos, está claro que las tasas de movimiento de Otura de hasta 12mm/año son muy superiores a las encontradas en los trabajos publicados sobre tectónica activa, y están más en consonancia con los resultados de los estudios de subsidencia debida a extracción de agua subterránea.

Si se analizan estos datos, se aprecia que las subsidencias relacionadas con desplazamientos verticales controlados por fallas, tienen tasas alrededor 1mm/año y, muy excepcionalmente, alcanzan los 6mm/año, mientras que en Otura la velocidad alcanza un máximo de 12mm/año. Durante el periodo de estudio (1993-2000) no se han registrado terremotos significativos en la zona, según datos del Observatorio Sismológico de Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos (IAG) de la Universidad de Granada (<http://www.ugr.es/~iag/div.html>) y de la Red Sísmica Española del Instituto Geográfico Nacional (<http://www.ugr.es/~iag/div.html>). De hecho, el mayor terremoto de la zona ocurrió en 1964 y alcanzó una magnitud de 4.3. Más recientemente, el mayor terremoto ocurrió en 1991, con $M=3$ y durante el periodo de estudio, los terremotos mayores ocurrieron en diciembre de 1994 y diciembre de 1999 con $M=2.5$.

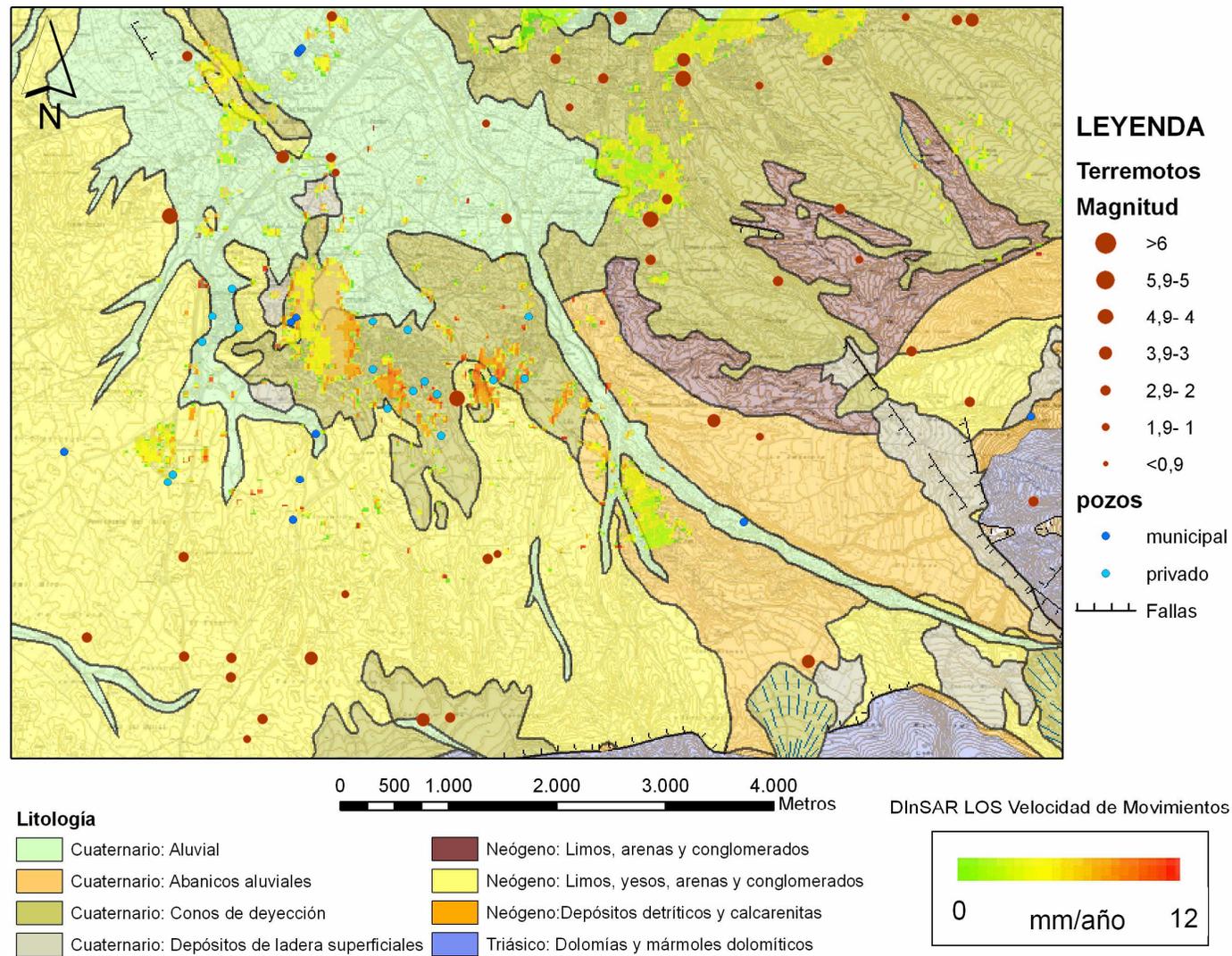


Figura 6.23: Mapa de integración de los resultados DInSAR con la geología de Otura y alrededores (IGME, 1980). Además se muestran el epicentro de los terremotos ocurridos y los pozos de extracción de agua. (Modificado de Fernandez et al. 2009)

Además, algunas campañas geodésicas llevadas a cabo en la zona para estimar los movimientos de las fallas de la cuenca de Granada, a las que ya se han hecho referencia con antelación, han registrado valores por debajo de 1mm/año, valores próximos a la precisión del instrumental empleado (Gil et al., 2002; Ruiz et al., 2003), y muy por debajo de las tasas estimadas con DInSAR en la zona de Otura.

Todas estas fuentes de datos diferentes apoyan la hipótesis de que los movimientos estimados se deban a subsidencia asociada al rápido cambio de uso del suelo, causado por el desarrollo urbano, y a la extracción de agua subterránea desde los pozos de bombeo, en el periodo de analizado con DInSAR y no a la tectónica activa. Las áreas subsidentes están compuestas por depósitos cuaternarios que incluyen capas de suelos arenosos y limosos, así como conglomerados, superpuestos a una formación Neógena compuesta de limos, yesos, arenas y conglomerados. La extracción de agua y el crecimiento urbano están correlacionados con la subsidencia observada.

Este es el resultado de la consolidación del suelo bajo las sobrecargas inducidas por las nuevas estructuras de las edificaciones construidas, y una paralela reducción de la proporción de vacío en el suelo durante el descenso del nivel freático, asociado con la continua extracción de agua.

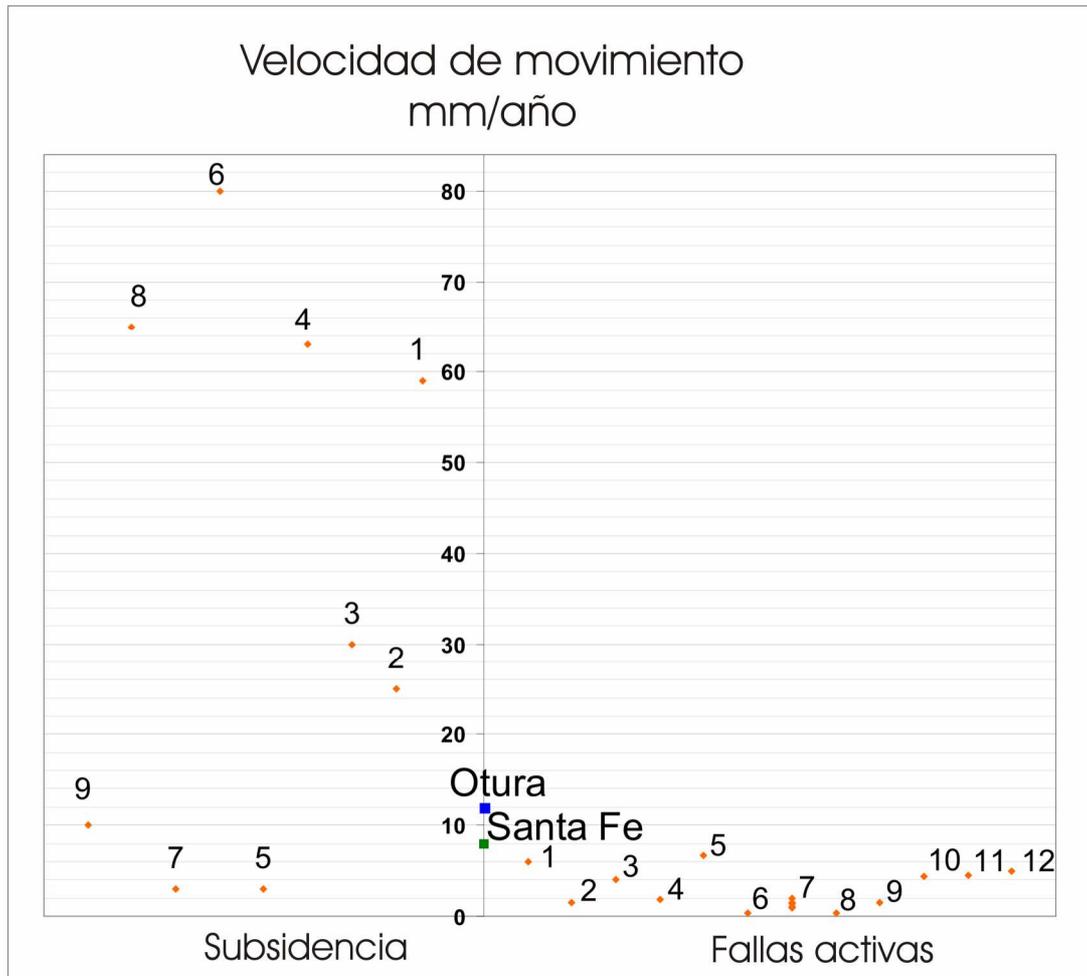


Figura 6.24: Gráfico de comparación entre las velocidades de movimientos verticales de subsidencias y fallas activas. El número corresponde al asignado a cada una de las referencias consultadas que se recogen en el Anexo2. Las velocidades DInSAR de las zonas de Santa Fe y Otura están representadas en el eje vertical con un cuadrado verde y azul respectivamente (modificado de Fernandez et al. 2009).

7.- CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un primer análisis DInSAR de la provincia de Granada, en el sur de España, usando dos paquetes de imágenes SAR SLC de los satélites ERS1-2, uno de 25 descendentes y otro de 15 ascendentes, que cubren un periodo de 7 años (desde Junio de 1993 a Diciembre de 2000).

Con ellas se han analizado dos comarcas diferentes. La primera es la cuenca del Río Guadalfeo, al sur de Sierra Nevada, ampliamente afectada por la tectónica activa y fenómenos de deslizamientos superficiales y poco profundos, donde no había datos cuantitativos disponibles sobre la actividad de los movimientos procedentes de técnicas instrumentales, previos a este trabajo. En esta zona se han estudiado de forma satisfactoria, 2 zonas:

- El deslizamiento traslacional de La Serreta de Tablones, con resultados DInSAR que cubren la mayor parte de la masa del deslizamiento, con una velocidad máxima estimada LOS de 6mm/año y con una distribución muy homogénea como corresponde a los deslizamientos planares.
- El pueblo de Albuñuelas, donde los valores LOS llegan hasta los 13mm/año. Un estudio adicional realizado para asesorar al Ayuntamiento de la localidad sobre el proceso, consistente en la medida de la inclinación de las fachadas de las casas, permite relacionar los desplazamientos con asentamientos diferenciales de las casas y no con la actividad de un deslizamiento rotacional. Este asentamiento está provocado por la infiltración de agua a lo largo de arroyos antiguos cubiertos que afectan a depósitos no consolidados, que se prepararon de forma rápida tras el terremoto de Andalucía de 1884 y reposan sobre un potente espesor de arcillas plásticas. La hipótesis anterior que atribuía a un deslizamiento rotacional la inclinación de las casas, se ha descartado, después de un intenso análisis de las direcciones y tendencias de las inclinaciones de las casas, análisis morfológicos locales y una vez que los resultados DInSAR ofrecieron una distribución de las zonas de deformación vertical incompatibles con el deslizamiento y compatibles con procesos de asiento diferencial.

Otras zonas han ofrecido resultados también incompatibles con la hipótesis inicial, si bien la interpretación geomorfológica no ha sido satisfactoria. Así en el caso del Barranco de Mezquerina, próximo al pueblo de Lanjarón, la velocidad de deformación máxima estimada en el periodo analizado es de 7,11mm/año. Teniendo en cuenta la superficie tan reducida sobre la que se han obtenido resultados, la ausencia de evidencias de procesos locales de inestabilidad activa reciente y la presencia en la zona de deformación estimada con DInSAR de materiales con yesos, la causa de la deformación difícilmente podría estar relacionada con la actividad de un deslizamiento y más bien podría asociarse a la disolución de yesos del sector, aunque no se ha podido confirmar al encontrarse la zona afectada en una propiedad privada inaccesible.

La segunda comarca de estudio corresponde a la ciudad de Granada y su área metropolitana, que han experimentado en los últimos 30 años un rápido crecimiento urbano. En esta comarca no se disponía de ningún indicio ni información previa de la existencia de subsidencias, por lo que la aplicación de la técnica DInSAR ha constituido una herramienta de detección de las deformaciones verticales, que ha permitido distinguir dos lugares con subsidencias:

- Santa Fe, que presenta valores de hasta 8 mm/año en la parte oeste, coincidiendo con el casco histórico.
- El pueblo de Otura y sus nuevas áreas de expansión urbana, localizadas al sur, con valores de hasta 12 mm/año.

Ambas zonas de subsidencia están relacionadas con la extracción de agua mediante bombeo de los acuíferos subterráneos. Las diferencias se presentan en los materiales de las dos zonas. Mientras Santa Fe está establecida sobre depósitos aluviales del Holoceno del río Genil, Otura está rodeada de margas del Mioceno y conglomerados del bajo a medio Pleistoceno y depósitos granulares, materiales muy sobreconsolidados con depósitos calcáreos, y afectados por fallas normales locales con cierta actividad sísmica. La subsidencia medida se explica como resultado de la extracción de agua del borde sur del acuífero de la cuenca de Granada, que está asociada con un depósito granular discontinuo de conglomerados, arenas y gravas en la base del Cuaternario.

En resumen la primera aplicación de la técnica DInSAR en la región de Andalucía ha permitido estimar tasas de deformaciones subverticales del terreno en diferentes lugares con las siguientes características:

- Confirmación de la actividad, aunque con velocidad muy lenta de un deslizamiento planar de la cuenca del Guadalfeo, en La Serreta de Tablones con una tasa de desplazamiento máxima de la masa de 6mm/año medidos en la dirección LOS.
- Existencia de subsidencias en el pueblo de Albuñuelas, asociado a asientos diferenciales con valores que llegan a los 13mm/año LOS en algunas zonas.
- Indicios de deformaciones subverticales con una tasa de 7,11mm/año LOS en la zona del Barranco de Mezquerina, aunque sus causas no están claras.
- Una primera estimación cuantitativa de movimiento subsidente en dos lugares distintos del área metropolitana de Granada: Santa Fe y Otura, pero con la misma génesis: la extracción de agua subterránea del acuífero de la cuenca de Granada, asociada al rápido crecimiento urbano.

Además las conclusiones de esta tesis doctoral abarcan varios aspectos relacionados con su elaboración y desarrollo en distintos planos:

1. Sobre la técnica y su aplicación a los distintos tipos de deformaciones del terreno.
2. Sobre la metodología empleada
3. Sobre la integración de los datos en un SIG.
4. Sobre las ventajas y limitaciones de la técnica DInSAR en el estudio de los movimientos de ladera y subsidencias.

7.1.- SOBRE LA TÉCNICA Y SU APLICACIÓN A LOS DISTINTOS TIPOS DE DEFORMACIONES DEL TERRENO

Como se ha comentado en capítulos previos de este trabajo, investigaciones realizadas con la técnica InSAR desde hace unos 15 años han demostrado el buen resultado de la técnica de la interferometría SAR y más concretamente de la interferometría diferencial

DInSAR a los estudios de movimientos verticales del terreno relacionados con distintas génesis.

Así pues los ejemplos sobre los que se ha aplicado esta técnica en la investigación presentada, con resultados satisfactorios vienen a respaldar el uso de esta técnica tanto en los de movimientos de ladera (La Serreta de Tablones) como en las subsidencias en áreas urbanas, por explotación intensiva de aguas subterráneas (Santa Fe y Otura).

Igualmente el análisis DInSAR se ha mostrado como una poderosa herramienta no solamente para resolver y precisar las interpretaciones geomorfológicas de los procesos, sino también para rebatir hipótesis previas y establecer interpretaciones correctas. Este ha sido el caso de Albuñuelas, donde la distribución de las zonas afectadas por deformaciones verticales y la medición directa de la inclinación de las fachadas de las viviendas del casco urbano, ha permitido descartar la hipótesis previa de un deslizamiento rotacional e interpretar las observaciones como resultantes de procesos de asiento diferencial del terreno bajo las viviendas. Un sondeo realizado el pasado mes de junio ha permitido comprobar la verosimilitud de esta última hipótesis.

Otras zonas se han mostrado más complejas o no han ofrecido resultados suficientes, o su distribución no ha permitido concluir con una interpretación del proceso causante.

Se puede afirmar la utilidad de la técnica en zonas afectadas por deformaciones verticales del terreno, en las que los factores limitantes para el uso de la técnica no impidan sus resultados. La interferometría diferencial DInSAR es una buena opción considerando el bajo presupuesto, cuando hay impedimentos para el establecimiento de redes de observación directa, o instrumentación y auscultación con técnicas específicas. Así los estudios con anclaje en el pasado reciente (es decir estudios actuales de situaciones pasadas posteriores a la existencia de imágenes radar de la zona, desde los años 1992-1993 o dilatados en el tiempo desde el pasado reciente a la actualidad), en zonas de difícil acceso y zonas susceptibles de estar afectadas por deformaciones en las que no se tienen datos o estudios acerca de si realmente existen desplazamientos y de su magnitud, la técnica DInSAR abre la posibilidad de obtener resultados valiosos.

7.2.- SOBRE LA METODOLOGÍA

Como se ha referido con anterioridad, la metodología utilizada en su fase específica ha sido desarrollada recientemente por la Unidad de Teledetección Activa del Instituto de

Geomática (UPC), en cuyo seno se han realizado las estancias y se ha trabajado durante la aplicación a las zonas de estudio objeto de la presente investigación. Previamente a esta investigación, solamente se habían analizado zonas subsidentes. Así pues el software de la fase específica es válido también los movimientos de ladera que se pueden también analizar con DInSAR. Los buenos resultados obtenidos, en el caso del deslizamiento de Tablones, prueban la fiabilidad y robustez del método. Además han contribuido a su evolución y perfeccionamiento, con desarrollo de estrategias de selección de zonas creadas de forma específica y orientadas al estudio de movimientos de ladera, extrapolables también a otras aplicaciones.

7.3.-SOBRE LA INTEGRACION DE LOS RESULTADOS EN UN SIG

Los resultados obtenidos una vez georreferenciados en un formato de imagen compatible con SIG, se integran con facilidad, lo que constituye una gran ventaja frente a otros tipos de resultados que deben ser digitalizados, para facilitar la gestión y control de las zonas estudiadas.

Otro aspecto a tener en cuenta es que, gracias a las funcionalidades de los SIG, se potencia el análisis de las relaciones entre los factores determinantes de los movimientos de ladera, lo que en algunos casos permite comprobar la distribución de la zona movilizada y establecer un sistema de control para el seguimiento futuro. Ello permite minimizar el impacto del movimiento de ladera sobre población y territorio.

En el caso de otro tipo de procesos de deformación del terreno, la integración en SIG de los resultados del análisis DInSAR contribuye en gran medida a la interpretación e identificación de las causas de la deformación.

Con ello se manifiesta la gran importancia que tiene la integración SIG de los resultados de los estudios realizados con DInSAR, tanto para su interpretación como para su explotación posterior.

7.4.-VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA TÉCNICA EN EL ESTUDIO DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA Y SUBSIDENCIAS

Tras la realización de este trabajo de investigación y como síntesis se extraen las siguientes conclusiones.

Movimientos de ladera:

Ventajas:

1. Confirmación de la existencia de actividad y su cuantificación en tasa de movimiento en dirección LOS.
2. Posibilidad de realizar el estudio en épocas pasadas recientes, imposible de otra forma si no se tiene ya establecida una red de observación que incluya este periodo.
3. Rapidez en la obtención de resultados: si bien la técnica DInSAR requiere gran cantidad de cálculos y operaciones, éstas siempre supondrán un tiempo menos dilatado que el de una red de observación directa en la que para obtener datos de 7 años son necesarios 7 años de observación.
4. Posibilidad de obtener resultados de estimación de tasas de deformación de forma indirecta, es decir sin necesidad de establecer instrumentos en campo, lo cual en zonas de difícil acceso, o de impedimento de vista e instalación de redes en la zona por motivos políticos, de catástrofes naturales o bélicos, es una gran ventaja.
5. Bajo coste con respecto a las técnicas de observación directa
6. Con un mismo paquete de imágenes adquiridas se pueden estudiar zonas incluidas en una superficie muy amplia de 100x100Km.
7. Se pueden integrar con otras informaciones para su análisis en un sistema de información geográfica.
8. Aporta datos de tipo superficial continuos en una malla de píxeles frente a las medidas puntuales de redes de nivelación o GPS que se realizan en un punto concreto.
9. Se puede estimar a priori el éxito de la aplicación del método teniendo en cuenta las condiciones de aplicabilidad de la técnica DInSAR en la fase Pre DInSAR.
10. Precisión milimétrica de los resultados (+-2-3mm/año).

Inconvenientes

1. Han de cumplirse las condiciones previas para poder aplicar la técnica DInSAR, que hacen referencia a la velocidad, tipo de cobertura de la superficie del terreno, dimensiones del deslizamiento, orientación de la ladera en estudio:
 - a. No se pueden estudiar laderas de orientaciones N-S o próximas a ellas
 - b. No se pueden estudiar laderas o movimientos de las mismas demasiado pequeñas, debido a la resolución espacial de las imágenes ERS1-2 de un mínimo de píxel de 20x20 metros.
 - c. No se pueden estudiar fenómenos de velocidades muy altas o de demasiado lentas, por debajo de 2mm/año, ya que estarían fuera de los límites actuales de aplicabilidad de la técnica, marcados por la precisión.
 - d. No se pueden estudiar deslizamientos con superficies del terreno rugosas variables en el tiempo, ya que ello supone una pérdida de coherencia que desemboca en la pérdida de información en fechas consecutivas del periodo analizado.
2. El horizonte temporal es del pasado reciente (1992 o 1993 según las zonas de estudio y los satélites seleccionados).
3. Requieren de gran cantidad de cálculos de procesado supervisado por un experto.
4. Los resultados suelen ser parciales, es decir frecuentemente no cubren el 100 % de la ladera.
5. La interpretación de los resultados es bastante difícil, máxime cuando no se dispone de datos adicionales de los movimientos del terreno obtenidos con otras técnicas de observación directa, ya hay que relacionar la dirección de medida del sensor LOS con la dirección real en el terreno del desplazamiento del deslizamiento en tres dimensiones.
6. Es necesario tener una zona cercana al deslizamiento libre de movimiento, para el establecimiento de la zona estable o bien de una zona con una tasa de movimiento conocida, en el periodo analizado. Esta zona debe de incluirse en el análisis DInSAR y cumplir con las condiciones de aplicabilidad de la técnica.

Subsidencias

Ventajas:

Además de los puntos de ventajas indicadas para los movimientos de ladera, números 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 10, se pueden citar los siguientes:

1. Posibilidad de detección de subsidencias donde no se tenía conocimiento previo de la existencia de las mismas, ya que las deformaciones en viviendas o estructuras pueden o no ser evidentes. En el caso de serlo pueden no relacionarse con movimientos de subsidencia.
2. Cuantificación del fenómeno de subsidencia detectado.

Inconvenientes:

Los inconvenientes de esta técnica en la detección y estimación de subsidencias se ven muy reducidas frente al estudio de movimientos de ladera.

1. Han de cumplirse las condiciones previas para poder aplicar la técnica DInSAR, si bien en zonas llanas y considerando movimientos verticales éstas se reducen considerablemente:
 - a. La dimensión o extensión de la subsidencia no debe ser demasiado pequeña para que puedan ser detectadas con DInSAR, debido a la resolución espacial de las imágenes ERS1-2 con un mínimo de píxel de 20x20 metros.
 - b. No se pueden estudiar fenómenos de velocidades muy altas o de demasiado lentas, por debajo de 2mm/año, ya que estarían fuera de los límites actuales de aplicabilidad de la técnica, marcados por la precisión.
 - c. No se pueden estudiar subsidencias en terrenos rugosos y variables en el tiempo, ya que ello conlleva una pérdida de coherencia que desemboca en la pérdida de información sobre fechas consecutivas del periodo analizado.
2. El horizonte temporal es del pasado reciente (1992 o 1993 según las zonas de estudio y los satélites seleccionados).

3. Requieren de gran cantidad de cálculos de procesado, supervisado por un experto.
4. Es necesaria la presencia, en una zona cercana a la subsidencia, de una zona libre de desplazamiento, para el establecimiento de la zona estable o bien de una zona de tasa de deformación conocida, en el periodo analizado. Esta debe de incluirse en el análisis DInSAR y cumplir con las condiciones de aplicabilidad de la técnica.

8.-LINEAS DE TRABAJO FUTURO

A la vista de los resultados obtenidos y su gran valor en el estudio de movimientos del terreno en la provincia de Granada, se pueden plantear para el futuro varias líneas de trabajo:

1. Ampliación del horizonte temporal del estudio en las zonas ya analizadas.
2. Análisis de otras zonas de Andalucía con esta técnica.
3. Avanzar en los estudios de riesgos naturales contribuyendo a la elaboración de mapas de peligrosidad.

8.1.- AMPLIACIÓN DEL HORIZONTE TEMPORAL DEL ESTUDIO EN LOS MOVIMIENTOS YA ANALIZADOS

Dado que se han estudiado diferentes tipos de procesos, las perspectivas de futuro abarcan todos y cada uno de ellos (Figura 8.1):

En lo que respecta a las zonas de **la cuenca del Río Guadalfeo** estarían encaminadas a:

- Primeramente la continuación del estudio en un periodo de tiempo posterior al considerado en esta investigación, es decir a partir del año 2001, para lo cual habría que realizar el análisis DInSAR con imágenes de ENVISAT 2002-2008 utilizando las mismas consideraciones acerca de los factores limitantes del estudio y partiendo de los resultados obtenidos en el análisis del periodo previo, en los casos de La Serreta de Tablones y Albuñuelas. En este caso del deslizamiento de La Serreta de Tablones además, dado que se ha confirmado la existencia de movimiento a través del presente estudio podría considerarse la conveniencia de la instalación de redes locales de observación directa del movimiento, ya sean de tipo topográfico clásico (red de nivelación) o basado en la navegación (red GPS), o de otro tipo como una red de inclinómetros o Láser scanner, en función de las posibilidades de instalación y coste de cada una de las redes.

Los datos que se obtuviesen de las medidas con estas redes servirían para realizar un análisis comparativo con los resultados obtenidos mediante DInSAR acerca de las

tasas de movimiento de los mismos, para establecer con el máximo rigor posible un sistema de seguimiento del deslizamiento.

- Igualmente se realizarían los análisis de un número mayor de deslizamientos para comprobar la posibilidad de actividades no registradas en el periodo anterior.

En el caso de las zonas de subsidencias detectadas en **el área metropolitana de Granada**, los estudios posteriores irán encaminados a:

- La realización de un nuevo análisis DInSAR con imágenes ENVISAT del periodo posterior al analizado (2002-2008) para poder evaluar si se trata de desplazamientos verticales ocurridos sólo en el periodo ya analizado o si han seguido existiendo después del año 2000, y determinar su tasa de actividad. Se mantendría el esfuerzo para confirmar la interpretación de las causas y se podrían establecer métodos de control y se trataría de establecer comunicación y colaboración con las autoridades provinciales y locales respecto a las consecuencias del proceso y su posible control .
- Además, al igual que en los otros casos, podría considerarse la instalación de redes locales de observación directa del movimiento, ya sean de tipo topográfico clásico (red de nivelación) o basado en la navegación (red GPS), en función de las posibilidades de instalación en cada una de las zonas urbanas y su coste.

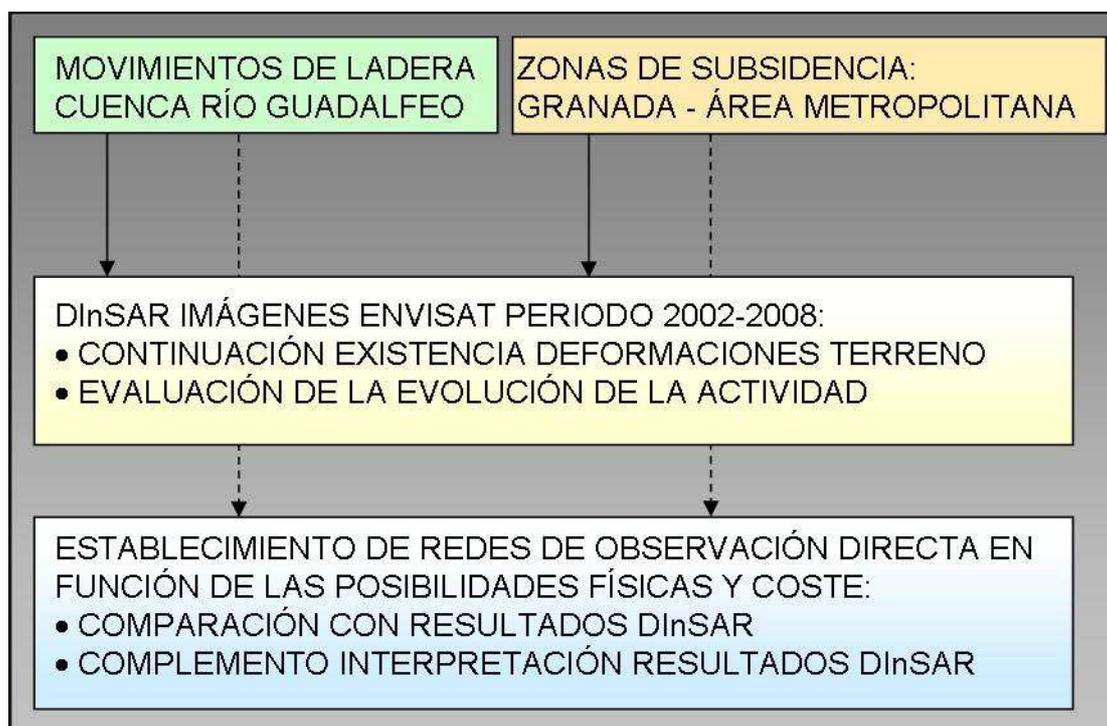


Figura 8.1: futuras actuaciones de continuación de las investigaciones.

8.2.- ANÁLISIS DE OTRAS ZONAS DE ANDALUCÍA

La puesta a punto de la técnica en la provincia de Granada y los resultados obtenidos hace que se plantee su aplicación a otros espacios geográficos de Andalucía donde se hayan detectado movimientos que cumplan los criterios de estudiabilidad con DInSAR.

8.3.-AVANZAR EN LOS ESTUDIOS DE RIESGOS NATURALES ELABORANDO MAPAS DE PELIGROSIDAD

Aunque los resultados obtenidos en movimientos de ladera se limitan a un deslizamiento, son el primer paso para la recopilación de los datos necesarios para la elaboración de mapas de peligrosidad, para los cuales los resultados sobre tasas de velocidad y régimen de actividad son imprescindibles.

9.-BIBLIOGRAFÍA

Alcantara-Ayala, I. (1999). The Torvizcon, Spain, landslide of February 1996: the role of lithology in a semi-arid climate. *Geofísica Internacional*. 38, 3-10.

Allan, T.D. Ed.1983.*Satellite Microwave Remote Sensing*. Ellis Howard. Nueva York.

Amelung F., Galloway D. L., Bell J. W., Zebker H. A., and Laczniaik R. J. 1999. Sensing the ups and downs of Las Vegas; InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*; June 1999; v. 27; no. 6; p. 483-486. DOI: 10.1130/0091-7613(1999)027.

Amelung, F., Jonson, S. Zebker, H. A. and Segall, P. 2000. Widespread uplift and “trapdoor” faulting on Galapagos volcanoes observed with radar interferometry. *Nature* 407, 993-996.

Antonie, P. (1992). “Les problèmes posés par l’instabilité des versants de grande ampleur-aspects géologiques”. Bull. Int. Assoc. Engineering Geology, N° 45. 9-24.

Arnaud, A., Adam, N., Hanssen, R., Inglada, J., Duro, J., Closa, J., Eineder, M. 2003. ASAR ERS Interferometric phase continuity. *Proceedings International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toulouse, 21-25 July, pp. 1133-1135.

Arturi, A.; Del Frate, F.; Lategano, E.; Schiavon, G.; Stramondo, S. 2003. The 1998 Sarno (Italy) landslide from SAR interferometry. *Proc. Fringe 2003*. SP-550, ESA (CD-ROM).

Avallone, A., Zollo, A., Briole, P., Delacourt, C. and Beauducel, F. 1999. Subsidence of Campi flegrei (Italy) detected by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 26 (15): 2303-2306.

Baer, G., Sandwell, D., Williams, S. Bock, Y. and Shamir, G. 1999. Coseismic deformation associated with the november 1995 Mw=7.1 Nuweiba earthquake, Gulf of Elat (Aqaba), detected by synthetic aperture radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 104 (B11): 25221-25232.

Barbieri, M., Lichtenegger, J. and Calabresi, G. 1999. The Izmit Earthquake: A quick Post-seismic Analysis with satellite observations, *ESA Bulletin*, 100: 107-110.

Bell J. W., Ramelli A. R. and Blewitt G. 2002. Land Subsidence in Las Vegas, Nevada, 1935–2000: New Geodetic Data Show Evolution, Revised Spatial Patterns, and Reduced Rates. *Environmental and Engineering Geoscience*; August 2002; v. 8; no. 3; p. 155-174; doi: 10.2113/8.3.155.

Bell, F. G. (2003). *Geological hazards: their assessment, avoidance and mitigation*. Spon Press, London, UK.

Berardino P., Constantini M., Franceschetti G., Iodice A., Pietranera L. and Rizzo V. 2003. Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy). *Engineering Geology*, 68, 31-51. doi:10.1016/S0013-7952(02)00196-5.

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 2375–2383.

Biescas, E; Crosetto, M; Agudo, M; Monserrat, O and Crippa, B. (2007). Two Radar Interferometric Approaches to Monitor Slow and Fast Land Deformation. *J. Surv. Engrg.*, Volume 133, Issue 2, pp. 66-71. doi:10.1061/(ASCE)0733-9453(2007)133:2(66)

Bovenga, F.; Nutricato, R.; Refice, A.; Wasowski, J. 2006. Application of multi-temporal differential interferometry to slope instability detection in urban/peri-urban areas. *Engineering Geology*, 2006/12/15, 88, 3-4, 218-239. doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.015.

Braga, J.C; Martin, J. M; Alcala, B. (1990). Coral reefs in coarse- terrigenous sedimentary environments (upper Tortonian, southern Spain). *Sediment. Geol.* 66, 135-150.

Briole, P. Massonnet, D. and Delacourt, C. 1997. Post eruptive deformation associated with the 1986-87 and 1989 lava flows of Etna detected by radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 24: 37-40.

Bulmer, M.H., Petley, D.N., Murphy, W., Mantovani, F. 2006. Detecting slope deformation using two-pass differential interferometry: Implications for landslide

studies on Earth and other planetary bodies. *Journal of Geophysical Research E: Planets*, 111 (6), art. no. E06S16.

Bürgmann, R., Schmidt, D., Nadeau, R. M., d'Alessio, M., Fielding, E. J., Manaker, D., McEvelly, T. V. and Murray, M. H. (2000), Earthquake Potential Along the Northern Hayward Fault, California, *Science*, 289:1178– 1182.

Camec, C., Massonnet, D., King, C. 1996. Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent. *Geophysical Research Letters*, 23 (24), pp. 3579-3582

Canuti, P.; Casagli, N.; Ermini, L.; Fanti, R. and Farina P. 2004. Landslide activity as a geoinicator in Italy: significance and new perspectives from remote sensing. . *Environmental Geology* Vol. 45, nº 7, 907-919. doi10.1007/s00254-003-0952-5.

Cardenal, J., Benavente, J., Cruz-Sanjulian, J. J. (1994). Chemical evolutions of groundwater in Triassic gypsum-bearing carbonate aquifers (Las Alpujarras, southern Spain). *Journal of Hydrology* 161, 3-30.

Cardinali, M.; Reichenbach, P.; Guzzetti, F.; Ardizzone, F.; Antonini, G.; Galli, M.; Cacciano, M; Castellani M. and Salvati P. (2002). “A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy”. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (2002) 2: 57–72.

Carneç, C., Delacourt, C., 2000. Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France. *Journal of Applied Geophysics* 43, 43–54.

Carneç, C., Fabriol, H. 1999. Monitoring and modeling land subsidence at the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, using SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 26 (9), pp. 1211-1214.

Cascini, L. 2008. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *Engineering Geology*, 102, 164-177.

Catani F., Farina P., Moretti S., Nico G. and Strozzi T. On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: estimation of landform attributes and mass

movements. *Geomorphology*, v. 66, iss. 1-4 [SPECIAL ISSUE], 119-131. doi:10.1016/j.geomorph.2004.08.012

Chacón, J. (2008 a). Los conceptos actuales de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo, en la prevención de movimientos de ladera, con ejemplos de aplicaciones prácticas. En De Lima, R. y Do Amaral, C. P. (Eds) 44 Congreso Brasileiro de Geologia. CENACID. Curitiba, Brasil.

Chacón, J. (2008 b). “Movimientos de Ladera. Ingeniería geológica aplicada a la obra civil”.

Chacón, J., Irigaray, C. y El Hamdouni, R. (1997). Informe sobre exposición a riesgos derivados de los movimientos de ladera en Albuñuelas (Granada). Incidencias de las lluvias de Noviembre 1996 a Enero 1997. Informe Final. Contrato Fundación Empresa-Universidad de Granada. Departamento de Ingeniería Civil. 34 pp + anexos.

Chacón, J.; Irigaray, C.; El Hamdouni, R. y Fernández, T. (1996). “Consideraciones sobre los riesgos derivados de los movimientos del terreno, su variada naturaleza y las dificultades de evaluación” Sexto Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio; Riesgos Naturales, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente; Chacón, J. e Irigaray, C. (eds.). Granada. Vol. I, 407-418.

Chacón, J., Irigaray, C. y El Hamdouni, R. (2007). Vuelco de viviendas de la población de Albuñuelas (Granada). Informe Final. Contrato Fundación Empresa-Universidad de Granada. Departamento de Ingeniería Civil. 43 pp + 3 anexos.

Chang C.P., Chang T.Y., Wang C.T., Kuo C.H., Chen K.S. 2004. Land-surface deformation corresponding to seasonal ground-water fluctuation, determining by SAR interferometry in the SW Taiwan. *Mathematics and Computers in Simulation* 67 (2004) 351–359. doi:10.1016/j.matcom.2004.06.003

Chorowicz, J; Scnanvic, J.Y.; Rouzeau, O.; Vargas Cuervo, G. 1998. Observation of recent and active landslides from SAR ERS-1 and JERS-1 imagery using a stereo-simulation approach: example of the Chicamocha valley in Colombia. *Int. j. remote sensing*, vol. 19, no. 16, 3187- 3196 .

Chuvieco, E. 1990. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Rialp. Madrid.

Clarke, P. J., Paradissis, D., Briole, P., England, P. C., Parsons, B. E., Billiris, H., Veis, G., and Ruegg, J.-C. (1996), Geodetic investigation of the 13 May 1995 Kozani-Grevena (Greece) earthquake, *Geophysical Research Letters*, 24:707– 710.

Colesanti, C. and Wasowski, J. 2004. Satellite SAR interferometry for wide-area slope hazard detection and site-specific monitoring of slow landslides. *Workshop International Landslide Symposium - ISL2004*.

Colesanti, C. and Wasowski, J. 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88, 3-4, 173-199. doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.013.

Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. 2003. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, 68 (1-2), 3-14. doi:10.1016/S0013-7952(02)00195-3.

Corsini, A.; Farina, P.; Antonello, G.; Barbieri, M.; Casagli, N.; Coren, F.; Guerri, L.; Ronchetti, F.; Sterzai, P.; Tarchi, D. 2006. Space-borne and ground-based SAR interferometry as tools for landslide hazard management in civil protection. *International Journal of Remote Sensing*, 27:12, 2351-2369. doi:10.1080/01431160600554405.

Crosetto M., Crippa B. and Biescas E. 2005. Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. *Engineering Geology*, Volume 79, Issues 1-2, 3 June 2005, 81-91. doi:10.1016/j.enggeo.2004.10.016

Crosetto, M., Crippa, B., Biescas, E., Monserrat, O. Agudo, M. Fernández, P. (2005). “Land deformation measurement using SAR interferometry: state-of-the-art”, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 06-2005, 497-510. Stuttgart (Germany) ISSN: 1432-8364/05/2005/0497.

Crosetto, M., Biescas, E., Duro, J., Closa, J., Arnaud, A. 2008. Generation of advanced ERS and ENVISAT interferometric SAR products using stable point network technique. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 74 (4), 443-451.

Cruden, D.M. (1991). A simple definition of Landslide. *Bulletin of the international association of Engineering Geology* 43, 27-29.

Cruden, D.M. y Varnes D.J. (1996). "Landslides, types and processes". En: Turner, A.K. & Schuster, R.L. (Eds.). Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247. Transportation Research Board, Washington, DC, pp.36-75.

Delacourt, C., Briole, P., Achache, J., Fruneau, B. and Carnec, C. (1997), Correction of the tropospheric delay in SAR interferometry and application to 1991-93 eruption of Etna volcano, Italy, in: AGU Fall meeting, December 8-12, San Francisco, USA,.

Delacourt, C., Allemand P., Squarzoni, C., Picard, F. Raucoules, D., Carnec, C. 2004. Potential and limitation of ERS-Differential SAR Interferometry for landslide studies in the French Alps and Pyrenees. *Proc. Fringe 2003*, SP-550, pp. 13-22. ESA (CD-ROM).

Deroin, J.P, Motti, E., Simonin, A. 1998. A comparison of the potential for using optical and SAR data for geological mapping in an arid region: the Atar site, Western Sahara, Mauritania. *Int. j. remote sensing*, vol. 19, no. 6, 1115- 1132.

Dixon, T.H., Amelung, F., Ferretti A., Novali, F., Rocca, F., Dokka, R., Sellall, G., Kim, S.W., Wdowinski, S. and Whitman, D. (2006). Subsidence and flooding in New Orleans. *Nature*, 441, 587-588. doi:10.1038/441587a.

Dunnicliff, J. (1988). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. Wiley, Nueva York.

Duro, J., Inglada, J., Closa, J., Adam, N. and Arnaud, A. 2003. High Resolution Differential Interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data. *Proc. of FRINGE 2003 Workshop*, Frascati, Italy, 1-5 December 2003 (ESA SP-550, June 2004).

Duro, J., Closa, J., Biescas, E., Crosetto, M. and Arnaud, A. 2005. High Resolution Differential Interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data. *Proc. 6th Geomatic Week*, Barcelona, 8-11 February (CDROM).

El Hamdouni, R. (2001). Estudio de movimientos de ladera en la cuenca del Río Ízbor mediante un SIG: contribución al conocimiento de la relación entre tectónica activa e inestabilidad de vertientes. Tesis Doctoral Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Granada. 430 p +8 mapas.

Elachi, C. 1982. Radar Images of the Earth from Space. *Scientific American*, vol 247, 46-53.

Farina P., Leva, D., Nico, G., Moretti, S., Rinaldi, M. and Tarchi, D. 2002. Estimating the morphological changes in fluvial beds by means of differential SAR interferometry. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings IGARSS 2002*.

Farina, P., Moretti, S., Colombo, D., Fumagalli, A. and Manunta P. 2004. Landslide Risk Analysis by means of Remote Sensing Techniques: Results from the ESA/SLAM Project. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings IGARSS 2004.*, Vol 1, 62-65.

Farina, P., Colombo, D., Fumagalli, A., Marks, F. and Moretti S. 2006. Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. *Engineering Geology* 88, 200-217. doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.007.

Feigl, K. L., Sargent, A. and Jacq, D. 1995. Estimation of an earthquake focal mechanism from a satellite radar interferogram: Application to the December 4, 1992 Landers aftershock. *Geophysical research Letters*, 22 (9): 1037-1040.

Fernández del Castillo, T. (2001). Cartografía, análisis y modelado de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en macizos rocosos mediante SIG: aplicación a diversos sectores del sur de la provincia de Granada. Tesis Doctoral Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Granada.

Fernández, P., J. Jiménez, R. EL Hamdouni, C. Irigaray, M. Crosetto, J. Chacón. "Application of differential SAR interferometry to the assessment of landslide activity in the Guadalfeo River Basin (Granada, Spain)". *Actas de la 7 Setmana Geomática: High resolution sensor and their applications*. Editorial: Instituto Cartográfico de Cataluña, Institut de Geomática. 2007. Depósito Legal: B-9432-2007.

Fernandez, P, Irigaray, C., Jimenez, J, El Hamdouni, R., Crosetto, M., Monserrat, O. and Chacon, J. (2009). First delimitation of areas affected by ground deformations in the Guadalfeo River Valley and Granada metropolitan area (Spain) using the DInSAR technique. *Engineering Geology*, 105, 84-101. doi:10.1016/j.enggeo.2008.12.005.

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C. Rocca, F. and Massonnet, D. 2007. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications TM-19. The Netherlands.

Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. 2000. Non linear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, n°5, 2202–2212

Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. 2001. Permanent Scatterers in SAR interferometry. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, n°1, 8–20.

Figueroa Vega, G.E. (1984). Land subsidence case history: Mexico. *Studies and reports in hydrology* 40, UNESCO, Paris, 217-232.

Finnegan, N.J., Pritchard, M. E., Lohman, R. B and Lundgren, P. R. 2008. Constrains on surface deformation in the Seattle, WA, urban corridor from satellite radar interferometry time –series analysis. *Geophysical Journal International*, 174, 29-41.

Fookes, P.G., Milligan, G. and Lee, M. (Eds) (2005). *Geomorphology for engineers*. CRC Press. Whittles Publishing. Scotland, UK.

Fruneau, B., Achache, J., Delacourt, C. 1996. Observation and modelling of the Saint-Etienne de Tinee landslide using SAR interferometry. *Tectonophys*, 265 (3–4), 181-190.

Fruneau, B.; Deffontaines, B.; Rudant, J.P. and Le Parmentier A.M. (2005). monitoring vertical deformation due to water pumping in the city of Paris (France) with differential Interferometry. *C.R. Geoscience*, 337, 1173-1183. doi:10.1016/j.crte.2005.05.014

Fujii, N., T Nakano, T. O. and Yamaoka, K. (1994), Detection of Ground Deformations by the Multi– pass Differential SAR– interferometry. Examples of the Active Volcanic Area, in: paper presented at the *1st workshop on SAR interferometry*, Tokyo, Japan, December 1994, NASDA.

Fujiwara, S., Yarai, H., Ozawa, S., Tobita, M., Murakami, M., Nakagawa, H., Nitta, K., Rosen, P. A. and Werner, C. L. (1998), Surface displacement of the March 26, 1997

Kagoshima-kenhokuseibu earthquake in Japan from synthetic aperture radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 25(24):4541–4544.

Gabriel, A. K., R. M. Goldstein, and H. A. Zebker (1989), Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry, *J. Geophys. Res.*, 94(B7), 9183–9191.

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 Resour. Res.* 98 Vol. 34, N°. 10 , p. 2573.

Galloway, D., Jones, D.R. and Ingebritsen, S.E. (Eds) (1999). *Land subsidence in the United States*. U.S. Geological Survey. Circular 1182. ISBN 0-607-92696-1.

Gens, R. and Genderen J. L. van. 1996. SAR interferometry: issues, techniques, applications. *Int. J. Remote Sensing*, vol 17, n°10, pp1803-1835.

Geomatics Solutions for Disaster Management. Edited by J. Li, S. Zlatanova, A. G. Fabbri. New York. Springer, 2007.

Geomorphology for engineers. Edited by P.G. Fookes, G. Milligan and M. Lee. Latheronwheel. Whittles, 2003

Gil A. J., Rodriguez-Caderot G., Lacy M. C., Ruiz A. M., Sanz de Galdeano, C. and Alfaro, P. (2002). Establishment of a Non-Permanent GPS Network to Monitor the Recent NE-SW Deformation in the Granada Basin (Betic Cordillera, Southern Spain). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 46 (3) 395-410. DOI 10.1023/A:1019530716324.

Goldstein, R. M., Engelhardt, H., Kamp, B. and Frolich, R. M. (1993), Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream, *Science*, 262:1525–1530.

Gubellini, A., Lombardini, G. and Russo, P. (1986) Application of high precision levelling and photogrammetry to the detection of the movements of an architectonic complex produced by subsidence in the town of Bologna. *Proceedings Third*

International Symposium on Land Subsidence, Venice, International Association of Hydrological Sciences, Publication No. 151, 257-267.

Halsema, D. van, Kooij, M. W. A. van der, Groenewoud, W., Huising, J., Ambrosious, B.A.C., and Klees, R. 1995. SAR interferometrie in Netherlands. *Remote sensing Nieuwsbrief*, Junio, pp. 31-34.

Hanssen, R., Vermeersen, B., Scharroo, R., Kampes, B., Usai, S., Gens, R. and Klees, R. (2000a), Deformatiepatroon van de aardbeving van 17 augustus 1999 in *Turkije gemeten met satelliet radar interferometrie*, *Remote Sensing Nieuwsbrief*, 90:42–44, In Dutch.

Hanssen, R. 2001. *Radar Interferometry. Data interpretation and error analysis*. Kluwer academic publishers. The Netherlands.

Hartl, Ph., Reich, M, Thiel, K. H. and Xia, Y. 1992. SAR-interferometry applying ERS1: some preliminary test results. *Proceedings of the first ERS-ISymposium*. ESA Paris, 219-222.

Hartl, P., Thiel, K.-H. and Wu, X. (1994a), Information extraction from ERS-1 SAR data by means of INSAR and D-INSAR techniques in Antarctic research, in: Second ERS1 Symposium— Space at the Service of our Environment, Hamburg, Germany, 11–14 October 1993, ESA SP-361, pp. 697– 701.

Hartl, P., Thiel, K. H., Wu, X., Doake, C. and Sievers, J. (1994b), Application of SAR Interferometry with ERS-1 in the Antarctic, *Earth Observation Quarterly*, 43:1– 4.

Hernandez, B., Cotton, F., Campillo, M. and Massonnet, D. 1997. A Comaprison between short term (co-seismic) and long term (one year) slip for the Landers earthquake: Measurements from strong motion and SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 24(13): 1579-1582.

Herrera G., Tomás R., Lopez-Sanchez J.M., Delgado J., Mallorqui J.J., Duque S., Mulas J. 2007. Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain). *Engineering Geology* 90 (2007) 148–159. doi:10.1016/j.enggeo.2007.01.001

Herrera, G., Tomás R., Lopez-Sanchez J.M., Delgado J., Vicente, F., Mulas, J., Cooksley, G., Sanchez, M., Duro, J., Arnaud, A., Blanco, P., Duque S., Mallorqui J.J., De la Vega-Panizo, R., Monserrat, O. 2008. Validation and comparison of Advanced Differential Interferometry Techniques: Murcia metropolitan area case study. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. Article in Press. doi:10.1016/j.isprsjprs.2008.09.008.

Heywood, C. E., Galloway, D. L., and Stork, S. V. (2002). *Ground Displacements Caused by Aquifer-System Water-Level Variations Observed Using Interferometric Synthetic Aperture Radar near Albuquerque, New Mexico*. Water-Resources Investigations Report 02-4235., US Geological Survey, USA.

Hilley, G.E., Bürgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., Rocca, F..2004. Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis. *Science*, 304, 1952-1955.

Hoen, E. W. and Zebker, H. A. (2000), Penetration Depths Inferred from Interferometric Volume Decorrelation Observed over the Greenland Ice Sheet, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(6):2571– 2583.

Hoffman, J., Zebker, H.A., Galloway D.L., Amelung F. (2001). Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry. *Water Resources Research*, Vol 37, Nº. 6, 1551–1566, 2001

IGME- Instituto Geológico y Minero de España. 1980: Mapa Geológico, nº 1026, escala 1:50.000 y memoria.

IGME- Instituto Geológico y Minero de España. 1988: Mapa Geológico, nº 1009, escala 1:50.000 y memoria.

IMGI, Institute for Meteorology and Geophysics. 2002. DINSAR Applications in High Alpine Areas. University of Innsbruck, Austria.

Irigaray, C., Lamas, F., El Hamdouni, R., Fernandez, T. and Chacon, J. (2000). The Importance of Precipitation and the Susceptibility of Slopes in the Triggering of Landslides Along Roads. *Natural Hazards*, 21(1): 65-81

Jiménez Perálvarez, J. D. (2005) Análisis de la susceptibilidad a los Movimientos de ladera mediante un SIG en la Cuenca vertiente al embalse de Rules, Granada. Memoria de Investigación de Doctorado. Universidad de Granada. Sin Publicar.

Jimenez, J, Irigaray, C, El Hamdouni, R, Fernandez, T and Chacon, J. (2005). Rasgos geomorfológicos y movimientos de ladera en la Cuenca Alta del río Guadalfeo, sector Cádiar-Órgiva (Granada). *Actas del VI Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables*, Volumen II. 891-902. Valencia.

Jónsson, S., Zebker, H., Cervelli, P., Segall, P., Garbeil, H., Mouginiis-Mark, P. and Rowland, S. (1999), A Shallow-Dipping Dike fed the 1995 Flank Eruption at Fernandina Volcano, Galapagos, Observed by Satellite Radar Interferometry, *Geophysical Research Letters*, 26(8): 1077– 1080.

Joughin, L, Gray, L., Bindschadler, R., Price, S., Morse, D., Hulbe, C., Mattar, K. and Werner, C. (1999), Tributaries of West Antarctic Ice Streams Revealed by RADARSAT Interferometry, *Science*, 286(5438):283– 286.

Joughin, I. R., Fahnestock, M., Ekholm, S. and Kwok, R. (1997), Balance Velocities of the Greenland ice sheet, *Geophysical Research Letters*, 24(23) :3045– 3048. Joughin, I. R., Kwok, R. and Fahnestock, M. A. (1998), Interferometric Estimation of Three-Dimensional Ice-Flow Using Ascending and Descending Passes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(1):25– 37.

Joughin, I. R., Winebrenner, D., Fahnestock, M., Kwok, R. and Krabill, W. (1996), Measurement of ice-sheet topography using satellite-radar interferometry, *Journal of Glaciology*, 42(140):10– 22.

Jung H.C., Kim S-W, Jung H-S, Min K.D, Won J-S. 2007. Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis. *Engineering Geology* 92 (2007) 1-13. doi:10.1016/j.enggeo.2007.02.007.

Kamelger, A.; Nagler, T.; Rott, H. 2003. Applications of DInSAR-methods in alpine areas for the detection and monitoring of mass-movements. *Proc. 4th European Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems (Italy)*.

Kampes, B. 2006. *Radar Interferometry. Persistent Scatterer Technique*. Springer. The Netherlands.

Kawai, S. and Shimada, M. (1994), Detections of Earth Surface Deformation Change by means of INSAR technique, in: paper presented at the *1st workshop on SAR interferometry*, Tokyo, Japan, December 1994, NASDA.

Keller, E. A. and Pinter, N. (1996). *Active Tectonics*, Prentice Hall, New York, 336 pp.

Kianička, J.; Čapková, I. 2005. Using SAR Interferometry for Detecting Landslides and Subsidence in the Coal Basin in Northern Bohemia. *Proc. International Symposium GIS .Ostrava 2005*.

Kimura, H., Yamaguchi, Y., 2000. Detection of landslide areas using satellite radar interferometry. , *Photogramm Eng Rem S*, 66 (3), 337-344.

Klees, R. and Massonnet, D. 1999. Deformation measurements using SAR interferometry: potential and limitations. *Geologie en Mijnbouw* 77: 161-176.

Klinger, Y., Michel, R. and Avouac, J.-P. (2000), Co-seismic deformation during the Mw 7.3 Aqaba earthquake (1995) from ERS-SAR interferometry, *Geophysical Research Letters*, 27(22):3651– 3655.

Kontogianni V., S. Pytharouli, S. Stiros, 2006. Ground subsidence, Quaternary faults and vulnerability of utilities and transportation networks in Thessaly, Greece. *Environ Geol* (2007) 52:1085-1095. doi 10.1007/s00254-006-0548-y.

Kwok, R. and Fahnestock, M. A. (1996), Ice Sheet Motion and Topography from Radar Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(1): 189–200.

Lanari, R., Lundgren, P. and Sansosti, E. (1998), Dynamic deformation of Etna volcano observed by satellite radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 25:1541–1544.

Lanari R., Zeni G., Manunta M., Guarino S., Berardino P. and Sansosti E. 2004. An integrated SAR/GIS approach for investigating urban deformation phenomena: a case of

study of the city of Naples, Italy. *Int. J. Remote Sensing*, 20 July, 2004 vol 25, n°14, 2855-2862. doi: 10.1080/01431160310001647750.

Land subsidence in the United States. Edited by D. Galloway, D.R. Jones, S.E. Ingebritsen. 1999. U.S. Geological Survey. Circular 1182. ISBN 0-607-92696-1.

Li, J. Zlatanova S. and Fabbri, A. G. (Eds) (2007). *Geomatics Solutions for Disaster Management*. Springer. New York.

Lu, Z., Fatland, R., Wyss, M., Li, S., Eichelberger, J., Dean, K. and Freymueller, J. (1997), Deformation of New Trident Volcano measured by ERS 1 SAR interferometry, Katmai National Park, Alaska, *Geophysical Research Letters*, 24(6):695– 698.

Lu, Z. and Freymueller, J. T. (1999), Synthetic aperture radar interferometry coherence analysis over Katmai volcano group, Alaska, *Journal of Geophysical Research*, 103(B12):29887– 29894.

Lundgren, P., Usai, S., Sansosti, E., Lanari, R., Tesauro, M., Fornaro, G. & Berardino, P., 2001. Modeling surface deformation observed with synthetic aperture radar interferometry at Campi Flegrei caldera, *J. Geophys.Res.*, **106**, 19 355–19 366.

Manunta, P., Brugioni, M., Casagli, N., Colombo, D., Deflorio, A.M., Farina, P., Ferretti, A., Gontier, E., Graf, K., Haeberle, J., Lateltin, O., Meloni, E., Mayoraz, R., Montini, G., Moretti, S., Paganini, M., Palazzo, F., Spina, D., Sulli, L., Strozzi, T. SLAM, A service for landslide monitoring based on eo-data. (2004) *Proc. FRINGE 2003*. European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, (550), pp. 451-456.

Massonnet D. and Adragna F., 1993. A full scale validation of Radar interferometry with ERS-1: the Landers earthquake. *Earth Observation Quarterly*, 41.

Massonnet, D; Rossi, M.; Carmona, C; Adragna, F.; Pelzer, G.; Feigl K. And Rabaute, T. 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364 (8): 138-142.

Massonnet, D., Feigl K; Rossi, M and Adragna F. 1994. Radar interferometric mapping of defromationa year after the Landers earthquake. *Nature* 369: 227-230.

Massonnet D. and Feigl, K. 1995. Satellite radar interferometry map of a coseismic deformation field of the M=6.1 Eureka Valley, California earthquake of May 17, 1993. *Geophysical Research Letters*, 22 (12):1541-1544.

Massonnet,D; Feigl, K; Vadon, H. and Rossi, M. 1996a. Coseismic deformation field of the M=6.7 Northridge, California earthquake of January, 17, 1994 recorder by two radar satellites using radar interference. *Geophysical Research Letters*, 23 (9): 969-972.

Massonnet, D.; Thatcher, W and Vadon, H. 1996b. Detection of postseismic fault zone collapse following the Landers earthquake. *Nature*, 382:489-497.

Massonnet, D. and Feigl K.L. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics* 36 (4), 441-500.

Massonnet, D. and Sigmundsson, F. 2000. Remote sensing volcano deformation by radar interferometry from various satellites. In: Mougini- Mark et al (eds). *Remote Sensing of active volcanism. Geophysical Monographs* 116, American Geophysical Union, 207-221.

Mei, S., Poncos, V., Froese, C. 2008. Mapping millimetre-scale ground deformation over the underground coal mines in the Frank Slide area, Alberta, Canada, using spaceborne InSAR technology. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34 (1-2), pp. 113-134.

Meisina, C., Zucca, F., Conconia, F., Verria, F., Fossatib, D., Cerianic, M., Allievi, J. 2007. Use of Permanent Scatterers technique for large-scale mass movement investigation. *Quaternary International* 171-172, 90-107. doi:10.1016/j.quaint.2006.12.011.

Meisina, C., Zucca, F., Fossati, D., Ceriani, M., Allievi, J. 2006. Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: The example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy). *Engineering Geology* 88, 240-259. doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.010.

Meyer, B., Armijo, R., Massonnet, D., de Chabaliér, J. B., Delacourt, C., Ruegg, J. C., Achache, J., Briole, P. and Panastassiou, D. (1996), The 1995 Grevena (Northern

Greece) earthquake: fault model constrained with tectonic observations and SAR interferometry, *Geophysical Research Letters*, 23:2677– 2680.

Michel, R.; Avouac, J. P. and Taboury, J. 1999. Measuring ground displacement from SAR amplitude images: application to the Landers earthquake. *Geophysical Research Letters*, 26 (7): 875-878.

Mikkelsen, P.E. (1996). Field Instrumentation. En: Turner, A.K. & Schuster, R.L. (Eds.). Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247. Transportation Research Board, Washington, DC, pp.278-316.

Mohr, J. J., Reeh, N. and Madsen, S. N. (1998), Three-dimensional glacial flow and surface elevation measured with radar interferometry, *Nature*, 291:273– 276.

Mora, O. (2004). Advanced differential interferometric SAR techniques for detection terrain and building displacements. Tesis doctoral. Departament de Teoria del Senyal i Communications. Universidad Politècnica de Catalunya. 179 pàgines.

Mora, O., Mallorquí, J.J., Broquetas, A., 2003. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 2243–2253.

Mouginis-Mark, P. J. (1995a), Analysis of volcanic hazards using Radar interferometry, *Earth Observation Quarterly*, 47:6– 10.

Mouginis-Mark, P. J. (1995b). Preliminary Observations of Volcanoes with the Radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4):934– 941.

Murakami, M; Tobita, M; Fujiwara, S and Saito, T. 1996. Coseismic crustal deformations of the 1994 Northridge, California, earthquake detected by interferometric JERS-1 Synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research*, 101 B4: 8605-8614.

Nagler, T; Rott, H and Kamelger, A. Analysis of Landslides in Alpine Areas by Means of SAR Interferometry. 2002. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings IGARSS 2002*.

Nico, G.; Pappalepore, M.; Pasquariello, G.; Refice, A.; Samarelli S. 2000. Comparison of SAR amplitude vs. coherence flood detection methods: a GIS application. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 21, nº 8, 1619-1631.

Ohkura, H. (1998), Applications of SAR data to monitoring Earth surface changes and displacements, *Advances in Space Research*, 21(3):485– 492.

Ozawa, S; Murakami, M.; Fujiwara, S. and Tobita, M. 1997. Syntetic aperture radar interferogram of the 1995 Kobe earthquake and its geodetic inversion. *Geophysical research Letters*, 24 (18), 2327-2330.

Peltzer, G. and Rosen, P. (1995), Surface Displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley, California Earthquake Observed by SAR Interferometry, *Science*, 268:1333–1336.

Peltzer, G., Crampé, G. and King, G. 1999. Evidence of non linear Elasticity of the Crust from Mw 7.6 Manyi (Tibet) Earthquake. *Science*, 286 (5438): 272-276.

Peltzer, G.; Hudnut, K. W. and Feigl K. L. 1994. Analisis of coseismic surface displacements gradients using radar interferometry: New insights into the Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 99 B11: 21971- 21981.

Peltzer, G.; Rosen, P; Rogez, F. and Hudnut, K. 1996. Postseismic rebound in fault step-overs caused by pore fluid flow. *Science*, 273: 1202-1204.

Peyret, M., Djamour Y., Rizza M., Ritz J.-F., Hurtrez J.-E., Goudarzi M.A., Nankali H., Chéry J., Le Dortz K., Uri F. 2008. Monitoring of the large slow Kahrod landslide in Alborz mountain range (Iran) by GPS and SAR interferometry. *Engineering Geology* 100, 131–141.

POLIMI, IMGI, GEOTEST . 2002. Monitoring slow evolving mass movements in alpine peri-urban environment: the Triesenberg-Triesen landslide (Fürstentum Liechtenstein). Department of Electronics and Information Sciences, Politecnico of Milan, Italy; Institute for Meteorology and Geophysics, University of Innsbruck, Austria; GEOTEST.2002. Institute for Meteorology and Geophysics, University of Innsbruck. MUSCL.

Prati, C, Rocca, F and Monti-guarnieri, A. 1992. SAR interferometry experiments with ERS-1. *Proceedings of the first ERS-1 Symposium*. ESA Paris. pp. 211-218.

Price, D.G and Higginbottom, I.E. (2009). Cap 6: Field Tests and Measurements pp159-208. En Freitas, M.H (Ed). *Engineering Geology. Principles and Practice*. Berlin. Springer. pp450.

Price, E.J. and Sandwell, D. T. 1998. Small scale deformations associated with the 1992 Landers, California, earthquake mapped by synthetic aperture radar interferometry phase gradients. *Journal of Geophysical Research*, 103(B11):27001-27016.

Raucoules D., C. Maisons, C. Carnec, S. Le Mouelic, C. King, S. Hosford. 2003. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France). Comparison with ground-based measurement. *Remote Sensing of Environment* 88 (2003) 468-478. doi:10.1016/j.rse.2003.09.005.

Raucoules D.; Colesanti, C. and Carnec C. (2007). Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence. *C.R. Geoscience* 339, 289-302. doi:10.1016/j.crte.2007.02.002

Refice, A.; Bovenga, F.; Guerriero, L. and Wasowski, J. 2001. DInSAR applications to landslide studies. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings IGARSS 2001*.

Refice, A.; Bovenga, F.; Wasowski, J.; Guerriero, L. 2000. Use of InSAR Data for Landslide Monitoring: a Case Study from Southern Italy. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings IGARSS 2000*.

Refice, A.; Guerriero, L.; Bovenga, F.; Wasowski, J.; Veneziani, N.; Atzori, S.; Ferrari, A.R.; Marsella, M. 2003. Detecting landslide activity by SAR interferometry. *Proc. 4th European Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems (Italy)*.

Reicherter, K.R., Peters, G. (2005). Neotectonic evolution of the Central Betic Cordilleras (Southern Spain). *Tectonophysics*, 405, 191-212.

Reilinger, R. E., Ergintav, S., Bürgmann, R., McClusky, S., Lenk, O., Barka, A., Gurkan, O., Hearn, L., Feigl, K. L., Cakmak, R., Aktug, B., Ozener, H. and Töksoz, M. N. (2000), Coseismic and Postseismic Fault Slip for the 17 August 1999, $M = 7.5$, Izmit, Turkey Earthquake, *Science*, 289(5484):1519– 1524.

Riedel, B., Walther, A. 2008. InSAR processing for the recognition of landslides. *Advances in Geosciences*, 14, pp. 189-194.

Rignot, E. J., Gogineni, S. P., Krabill, W. B. and Ekholm, S. (1997), North and northeast Greenland ice discharges from satellite radar interferometry, *Science*, 276:934– 937.

Rizo V., Tesauro, M. SAR Interferometry and Field Data of Randazzo Landslide (Eastern Sicily, Italy). *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology*, Vol. 25, No. 9, 771-780.

Rodríguez Ortiz, J. M., Prieto, C. and Hinojosa, J. A. (1978). Regional studies on mass movements in Spain. *Proc. IIIrd I.A.E.G. Congress*, I, 1: 29, 267-278.

Rodriguez, K.M. 2002. Classification of Landslide Surfaces Using Fully Polarimetric SAR: Examples from Taiwán. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings IGARSS 2002*.

Rosen, P., Werner, C., Fielding, E., Hensley, S. and Vincent, S. B. P. (1998), Aseismic creep along the San Andreas fault northwest of Parkfield, CA measured by radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 25(6):825– 828.

Rosen, P. A., Hensley, S., Zebker, H. A., Webb, F. H. and Fielding, E. J. (1996), Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry, *Journal of Geophysical Research*, 101(E10):23109– 23125.

Rosen, P.A, Hensley S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S. N., Rodriguez, E. and Goldstein, R. M. 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE. Vol 88, (3), 333-382. Invited paper*.

Roth, A., Adam, N., Schwäbisch, M., Müschen, B., Böhm, C. and Lang, O. (1997), Observation of the effects of the subglacial volcano eruption underneath the Vatnajökull

glacier in Iceland with ERS-SAR data, in: *Proc. of the third ERS symposium*, Florence, Italy, 17-20 March 1997.

Rott, H. and Siegel, A. (1997), Glaciological Studies in the Alps and in Antarctica Using ERS Interferometric SAR, in: 'FRINGE 96' workshop on ERS SAR Interferometry, Zürich, Switzerland, 30 Sep– 2 October 1996, pp. 149– 159, ESA SP-406, Vol II.

Rott, H., Stuefer, M., Siegel, A., Skvarca, P. and Eckstaller, A. (1998), Mass fluxes and dynamics of Moreno Glacier, Southern Patagonia Icefield, *Geophysical Research Letters*, 25(9):1407– 1410.

Rott H., Scheuchl B. and Siegel A. 1999. Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: A case study from a mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps, Austria. *Geophysical Research Letters* Vol. 26, No. 11, 1629-1632.

Rott, H. and Siegel, A. 1999. Analysis of mass movements in alpine terrain by means of SAR Interferometry. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings IGARSS'99*.

Rott, H. and Nagler, T. 2006. The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Advances in Space research* 37, 710-719.

Ruiz A., M., Ferhat G., Alfaro P., Sanz de Galdeano C., de Lacy M. C., Rodriguez-Caderot G., Gil A. J. (2003). Geodetic measurements of crustal deformation on NW–SE faults of the Betic Cordillera, southern Spain, 1999–2001. *Journal of Geodynamics*, 35 (3), 259-272.

Samarelli, S. (Reference person), Planetek Italia s.r.l. (Co-ordinator). 2002. SLAM Project Final Report. <http://dup.esrin.esa.int/projects/summary52.asp>. ESA.

Sandwell, D. T., Sichoix, L., Agnew, D, Bock, Y. and Minster, J. B. 2000. Near realtime radar interferometry of the Mw 7.1 Hector mine Earthquake, *Geophysical Research Letters*, 27 (19): 3101-3104.

Sigmundsson, F., Vadon, H. and Massonnet, D. (1997), Readjustment of the Krafla spreading segment to crustal rifting measured by Satellite Radar Interferometry, *Geophysical Research Letters*, 24(15): 1843– 1846.

Sigmundsson, F., Durand, P. and Massonnet, D. (1999). Opening of an eruptive fissure and seaward displacement at Piton de la Fournaise volcano measured by RADARSAT satellite radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 26(5):533.

Singh, L.P.; van Westen, C.J.; Champati Ray, P.K. and Pasquali, P. 2005. Accuracy assessment of InSAR derived input maps for landslide susceptibility analysis: a case study from the Swiss Alps. *Landslides* Vol 2: 221-228. doi10.1007/s10346-005-0059-z.

Singhroy V. and Molch K. 2004 a. Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques. *Advances in Space Research* Volume 33, Issue 3, 290-295.

Singhroy, V., Molch, K. 2004 b. Geological case studies related to RADARSAT-2. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30 (6), pp. 893-902.

Singhroy, V.; Matter, K.E.; Gray, A.L. 1998. Landslide characterization in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images. *Advances in Space Research*, 21, n°3, 465-476.

Singhroy, V.; Molch, K.; Bulmer, M. 2002.Characterization of landslide deposits using SAR Images. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings IGARSS 2002*, 1, pp. 185-187.

Singhroy, V.H.; Loehr, J.E.; Correa, A.C. 2000. Landslide Risk Assessment with High Spatial Resolution Remote Sensing Satellite Data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings IGARSS 2000*), 6, pp. 2501-2503.

Singhroy V.; Ohkura, H.; Glenn, N. 2002. Earth Observation for Landslide Assessment. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings IGARSS 2002*.

Sneed, M., Ikehara, M., Balloway, D., Amelung, F., 2001. Detection and measurement of land subsidence using global positioning system and interferometric synthetic aperture radar, Coachella Valley, California, 1996–1998. Water-Resources Investigations. Report 01-4193, US Geological Survey, USA.

Sowers, G.F., and Royster, D.L. (1978). Field Investigation. In *Special report 176: Landslides: Analysis and Control* (Schuster R. L. and Krizek, R. J. eds.), TRB National Research Council, Washington, D. C., Chap. 4, pp81-111.

Squarzoni C., Delacourt C., Allemand, P. 2003. Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry. *Engineering Geology*, 68, 53-66.

Stochalak, J. (1974). The classification of slope deposit from engineering geological point of view. En: *Anais. International Congress of Engineering Geology*, 2, v.2: V27.1-V27.12. IAEG. São Paulo.

Stramondo, S., Tesauro, M., Briole, P., Sansosti, E., Salvi, S., Lanari, R., Anzidei, M., Baldi, P., Fornaro, G., Avallone, A., Buongiorno, M. F. and Boschi, G. F. E. (1999), The September 26, 1997 Colfiorito, Italy, earthquakes: modeled coseismic surface displacement from SAR interferometry and GPS, *Geophysical Research Letters*, 26(7):883– 886.

Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F.R., Moro M., Saroli M. 2008. Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of Environment* 112, 3160–3172

Stramondo S., M. Saroli, C. Tolomei, M. Moro, F. Doumaz, A. Pesci, F. Loddo, P. Baldi, E. Boschi. 2007. Surface movements in Bologna (Po Plain, Italy) detected by multitemporal DInSAR. *Remote Sensing of Environment*. 110 (2007) 304-316. doi:10.1016/j.rse.2007.02.023.

Strozzi T., U. Wegmüller, C. L. Werner, A. Wiesmann, V. Spreckels, 2003. JERS SAR Interferometry for Land Subsidence Monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 7, July 2003, pp 1702-1708.

Strozzi, T., P. Farina, A. Corsini, C. Ambrosi, M. Thüring, J. Zilger, A. Wiesmann, U. Wegmüller and C. Werner. 2005. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides* 2 (3), 193-201. doi:10.1007/s10346-005-0003-2.

Strozzi, T., Wegmüller, U., Keusen, H.R., Graf, K., Wiesmann, A. 2006. Analysis of the terrain displacement along a funicular by SAR interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3 (1), pp. 15-18.

Teatini P., L. Tosi, T. Strozzi, L. Carbognin, U. Wegmüller, F. Rizzetto. 2005. Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system. *Remote Sensing of Environment* 98 (2005) 403 – 413. doi:10.1016/j.rse.2005.08.002

Thatcher, W. and Massonnet, D. (1996), Crustal deformation at Long Valley Caldera. eastern California, 1992-1996 inferred from satellite radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 24(20):2519– 2522.

Thiel, K.-H., Wu, X. and Hartl, P. (1997), ERS-tandem-interferometric observation of volcanic activities in Iceland, in: Third ERS Symposium— Space at the Service of our Environment, Florence, Italy, 17– 21 March 1997, ESA SP-414, pp. 475– 480.

Thornes, J. B. and Alcantara-Ayala, I. (1998). Modelling mass failure in a Mediterranean mountainous environment: climatic, geological, topographical and erosional controls. *Geomorphology* 24: 87–100

Tomás R., Y. Márquez, J. M. Lopez-Sanchez, J. Delgado, P. Blanco, J.J. Mallorquí, M.Martínez, G. Herrera, J. Mulas. 2005. Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of Environment* 98 (2005) 269 – 283. doi:10.1016/j.rse.2005.08.003

Trevett, J.W. 1986. *Imaging Radar for Resources Surveys*. Chapman and Hall. Londres.

U.S. Bureau of Mines Editor. (1996). “Dictionary of Mining, Mineral, and Related Terms”. Second Edition. U.S. Department of the Interior.

Usai, S. and Klees, R. (1999b), SAR Interferometry On Very Long Time Scale: A Study of the Interferometric Characteristics Of Man-Made Features, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(4):2118– 2123.

Vallone, P., Giammarinaro, M.S., Crosetto, M., Agudo, M., Biescas, E. (2008). Ground motion phenomena in Caltanissetta (Italy) investigated by InSAR and geological data integration. *Engineering Geology*, 98, 144-155.

Van Arsdale, R. (2000). Displacement history and slip rate on the Reelfoot fault of the New Madrid seismic zone. *Engineering Geology* 55 (2000) 219–226

Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and processes. Chapter 2 in Schuster, R.L. and Krizek, R.J. (eds). *Landslides- Analysis and Control*. National Academy of Sciences, Washington DC, 11-33.

Vilardo, G., Ventura G., Terranova C., Matano F., Nardò S. 2009. Ground deformation due to tectonic, hydrothermal, gravity, hydrogeological, and anthropic processes in the Campania Region (Southern Italy) from Permanent Scatterers Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Remote Sensing of Environment* 113, 197–212.

Wadge, G., Scheuchl, B. and Stevens, N. F. (1999), Spaceborne radar measurements of the eruption of Soufriere Hills Volcano, Montserrat during 1996-99, *J. Volcanology and Geothermal Research*.

Waltham, T, Bell, F. and Culshaw, M. (2005). *Sinkholes and subsidence*. Springer-Verlag, Berlin and N. York, 382pp.

Waltham, T. (2005). *Subsidence*, pp318-342 in Fookes, P.G., Milligan, G. and Lee, M. (Eds) (2005). *Geomorphology for engineers*. CRC Press. Whittles Publishing. Scotland, UK. 851pp.

Wasowski, J; Bovenga, F; Casarano, D; Nutricato, R; Refice, A. 2003. Test of the applicability of a multitemporal differential interferometry analysis to landslide studies in periurban areas. *Proc. FRINGE 2003*. ESA SP-550, 2004.

Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T. and Wiesmann, A., 2003, Interferometric point target analysis for deformation mapping. *Proceedings of IGARSS 2003*, 21–25 July 2003, Toulouse, France.

Wicks, Jr, C., Thatcher, W. and Dzurisin, D. (1998), Migration of Fluids Beneath Yellowstone Caldera Inferred from Satellite Radar Interferometry, *Science*, 282:458–462.

Williams, C. A. and Wadge, G. (1998), The effects of topography on magma chamber deformation models: Application to Mt. Etna and radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 25(10):1549– 1552.

Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI) (1990 a). A Suggested method for reporting a Landslide. *Bulletin of IAEG* N° 41. 5-12.

Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI) (1990 b). Suggested nomenclature for landslides. *Bulletin of IAEG* N° 41. 13-16.

Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI) (1993 a). A Suggested method for describing the activity of a Landslide. *Bulletin of IAEG* N° 47. 53-57.

Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI) (1993 b). *Multilingual Landslide Glossary*. BiTech Publishers, Richmond, British Columbia, Canada, 59pp.

Zebker, H., Rosen, P., Hensley, S. and Mouginiis-Mark, P. (1996), Analysis of active lava flows on Kilauea volcano, Hawaii, using SIR-C radar correlation measurements, *Geology*, 24:495– 498.

Zebker, H.A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M, Gabriel, A. And Webner, C.L. 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 99, B10: 19617-19634.

Zhang Q., Zhao C., Din X. and Peng, J. 2007. Monitoring Xian Land Subsidence Evolution by Differential SAR Interferometry, en *Geomatics Solutions for Disaster Management*. Edited by J. Li, S. Zlatanova, A. G. Fabbri. New York. Springer, 2007.

Zhou Y., Stein A. and Molenaar M. (2003). Integrating interferometric SAR data with levelling measurements of land subsidence using geostatistics. *International Journal of Remote Sensing* 24: 18, 3547 – 3563. doi:10.1080/0143116021000023880.

10.- ANEXOS**10.1.-ANEXO 1: LISTADO DE LOS INTERFEROGRAMAS USADOS****TRAYECTORIA DESCENDENTE**

Nº Inter..	Órbita Master	fecha o.m	sat o.m	Órbita slave	fecha o.s	sat o.s	Base perpendicular	AT
4	12449	19931202	E1	22312	19951021	E1	16,481	689
5	12449	19931202	E1	2639	19951022	E2	110,44	690
17	12449	19931202	E1	41851	19990717	E1	106,1	2054
18	12449	19931202	E1	43354	19991030	E1	112,34	2159
25	20308	19950603	E1	21310	19950812	E1	135,18	70
26	20308	19950603	E1	1637	19950813	E2	74,087	71
29	20308	19950603	E1	3641	19951231	E2	176,7	211
30	20308	19950603	E1	25318	19960518	E1	143,69	350
31	20308	19950603	E1	5645	19960519	E2	64,792	351
32	20308	19950603	E1	8651	19961215	E2	304,88	561
33	20308	19950603	E1	10154	19970330	E2	271,97	665
34	20308	19950603	E1	10655	19970504	E2	352	700
35	20308	19950603	E1	11657	19970713	E2	131,06	770
36	20308	19950603	E1	14663	19980208	E2	270,28	979
37	20308	19950603	E1	15665	19980419	E2	181,26	1051
39	20308	19950603	E1	20675	19990404	E2	76,098	1401
42	20308	19950603	E1	23681	19991031	E2	346,43	1611
43	20308	19950603	E1	24683	20000109	E2	147,66	1681
45	20308	19950603	E1	27689	20000806	E2	130,04	1890
48	21310	19950812	E1	1637	19950813	E2	61,095	1
51	21310	19950812	E1	3641	19951231	E2	41,519	141
52	21310	19950812	E1	25318	19960518	E1	8,5098	280
53	21310	19950812	E1	5645	19960519	E2	70,388	281
55	21310	19950812	E1	10154	19970330	E2	136,82	595
57	21310	19950812	E1	11657	19970713	E2	266,25	700
59	21310	19950812	E1	15665	19980419	E2	46,088	981
61	21310	19950812	E1	20675	19990404	E2	59,084	1331
64	21310	19950812	E1	23681	19991031	E2	211,21	1541
65	21310	19950812	E1	24683	20000109	E2	282,87	1611
67	21310	19950812	E1	27689	20000806	E2	5,1428	1820
68	21310	19950812	E1	28691	20001015	E2	308,12	1890
73	1637	19950813	E2	25318	19960518	E1	69,604	279
74	1637	19950813	E2	5645	19960519	E2	9,2928	280
76	1637	19950813	E2	10154	19970330	E2	197,9	594
78	1637	19950813	E2	11657	19970713	E2	205,14	699
79	1637	19950813	E2	14663	19980208	E2	344,4	908
80	1637	19950813	E2	15665	19980419	E2	107,18	980
82	1637	19950813	E2	20675	19990404	E2	2,0118	1330
85	1637	19950813	E2	23681	19991031	E2	272,31	1540
86	1637	19950813	E2	24683	20000109	E2	221,76	1610
88	1637	19950813	E2	27689	20000806	E2	55,95	1819
89	1637	19950813	E2	28691	20001015	E2	369,24	1889
91	22312	19951021	E1	2639	19951022	E2	126,92	1
103	22312	19951021	E1	41851	19990717	E1	89,622	1365
104	22312	19951021	E1	43354	19991030	E1	95,865	1470
107	22312	19951021	E1	26687	20000528	E2	20,995	1680
109	22312	19951021	E1	28691	20001015	E2	314,5	1820

Nº Inter..	Órbita Master	fecha o.m	sat o.m	Órbita slave	fecha o.s	sat o.s	Base perpendicular	AT
133	3641	19951231	E2	10154	19970330	E2	95,298	454
137	3641	19951231	E2	15665	19980419	E2	4,5694	840
150	25318	19960518	E1	10154	19970330	E2	128,31	315
154	25318	19960518	E1	15665	19980419	E2	37,578	701
166	5645	19960519	E2	10154	19970330	E2	207,22	314
168	5645	19960519	E2	11657	19970713	E2	195,85	419
170	5645	19960519	E2	15665	19980419	E2	116,47	700
183	8651	19961215	E2	11657	19970713	E2	173,83	209
184	8651	19961215	E2	14663	19980208	E2	34,589	418
199	10154	19970330	E2	15665	19980419	E2	90,73	386
201	10154	19970330	E2	20675	19990404	E2	195,9	736
211	10655	19970504	E2	14663	19980208	E2	81,735	279
223	11657	19970713	E2	14663	19980208	E2	139,23	209
226	11657	19970713	E2	20675	19990404	E2	207,15	631
241	14663	19980208	E2	24683	20000109	E2	122,63	702
247	15665	19980419	E2	20675	19990404	E2	105,17	350
250	15665	19980419	E2	23681	19991031	E2	165,14	560
253	15665	19980419	E2	27689	20000806	E2	51,232	839
270	20675	19990404	E2	27689	20000806	E2	53,94	489
273	41851	19990717	E1	43354	19991030	E1	6,246	105
276	41851	19990717	E1	26687	20000528	E2	110,62	315
278	41851	19990717	E1	28691	20001015	E2	224,92	455
282	43354	19991030	E1	26687	20000528	E2	116,86	210
284	43354	19991030	E1	28691	20001015	E2	218,65	350
289	23681	19991031	E2	28691	20001015	E2	96,926	349

TRAYECTORIA ASCENDENTE

Nº Inter	Órbita Master	fecha o.m	sat o.m	Órbita slave	fecha o.s	sat o.s	Base perpendicular	AT
4	9851	19930603	ERS1	1544	19950806	ERS2	197,440244	794
5	9851	19930603	ERS1	22720	19951118	ERS1	155,445536	898
7	9851	19930603	ERS1	24724	19960406	ERS1	365,776548	1038
8	9851	19930603	ERS1	11063	19970601	ERS2	45,192977	1459
9	9851	19930603	ERS1	12065	19970810	ERS2	246,347838	1529
10	9851	19930603	ERS1	13067	19971019	ERS2	0,33967257	1599
12	9851	19930603	ERS1	21584	19990606	ERS2	142,161645	2194
16	10352	19930708	ERS1	20716	19950701	ERS1	250,432289	723
18	10352	19930708	ERS1	22720	19951118	ERS1	352,132908	863
19	10352	19930708	ERS1	3047	19951119	ERS2	13,0672707	864
22	10352	19930708	ERS1	12065	19970810	ERS2	261,226919	1494
24	10352	19930708	ERS1	15572	19980412	ERS2	62,1215751	1739
29	11354	19930916	ERS1	1544	19950806	ERS2	297,560926	689
32	11354	19930916	ERS1	24724	19960406	ERS1	129,275756	933
37	11354	19930916	ERS1	21584	19990606	ERS2	352,772332	2089
42	20716	19950701	ERS1	3047	19951119	ERS2	263,483961	141
47	20716	19950701	ERS1	15572	19980412	ERS2	312,521772	1016
49	20716	19950701	ERS1	25592	20000312	ERS2	47,5199019	1716
51	1544	19950806	ERS2	22720	19951118	ERS1	352,880128	104
53	1544	19950806	ERS2	24724	19960406	ERS1	168,256851	244
54	1544	19950806	ERS2	11063	19970601	ERS2	242,635858	665
56	1544	19950806	ERS2	13067	19971019	ERS2	197,775244	805
58	1544	19950806	ERS2	21584	19990606	ERS2	55,2938151	1400
61	22720	19951118	ERS1	3047	19951119	ERS2	339,063237	1
63	22720	19951118	ERS1	11063	19970601	ERS2	110,242578	561
64	22720	19951118	ERS1	12065	19970810	ERS2	90,8915309	631
65	22720	19951118	ERS1	13067	19971019	ERS2	155,109242	701
66	22720	19951118	ERS1	15572	19980412	ERS2	289,997256	876
67	22720	19951118	ERS1	21584	19990606	ERS2	297,554181	1296
69	22720	19951118	ERS1	26594	20000521	ERS2	115,095583	1646
72	3047	19951119	ERS2	12065	19970810	ERS2	248,145253	630
74	3047	19951119	ERS2	15572	19980412	ERS2	49,0558627	875
76	3047	19951119	ERS2	25592	20000312	ERS2	215,98655	1575
77	3047	19951119	ERS2	26594	20000521	ERS2	223,914112	1645
80	24724	19960406	ERS1	13067	19971019	ERS2	366,062169	561
82	24724	19960406	ERS1	21584	19990606	ERS2	223,559118	1156
85	11063	19970601	ERS2	12065	19970810	ERS2	201,138182	70
86	11063	19970601	ERS2	13067	19971019	ERS2	44,8537524	140
88	11063	19970601	ERS2	21584	19990606	ERS2	187,337262	735
90	11063	19970601	ERS2	26594	20000521	ERS2	225,354983	1085
91	12065	19970810	ERS2	13067	19971019	ERS2	245,957739	70
92	12065	19970810	ERS2	15572	19980412	ERS2	199,092265	245
93	12065	19970810	ERS2	21584	19990606	ERS2	388,543519	665
95	12065	19970810	ERS2	26594	20000521	ERS2	24,2044579	1015
97	13067	19971019	ERS2	21584	19990606	ERS2	142,509281	595
99	13067	19971019	ERS2	26594	20000521	ERS2	270,194184	945
101	15572	19980412	ERS2	25592	20000312	ERS2	265,020082	700
102	15572	19980412	ERS2	26594	20000521	ERS2	174,863551	770

10.2.-ANEXO 2: TABLAS CON LA REFERENCIAS DE ARTÍCULOS CONSULTADOS SOBRE FALLAS ACTIVAS Y SUBSIDENCIAS.

Referencia	Tipo Falla	edad	Tasa Vertical.	Zona Geológica
Mrlina (2000).			4-6 mm/año	Zona de Novy Kostel. Rep. Checa
Vyskocil et al (1992).			Media anual de cambio vertical: -1.5 mm/año	Falla de Kalabsha, Noroeste del Lago Aswan
Giménez (2001).	Normal e inversa		- zona central (Valencia): deformaciones tectónicas prácticamente inapreciables - zona norte (Este Pirineos) y área sur (Este Béticas): 1-4 mm/año.	Este de la península Ibérica: 3 zonas: 1.- norte: Este de los Pirineos y Costa Catalana 2.- zona central (Valencia Trough) 3.- Área sur (Este Béticas)
Chevalier et al (2003).	Falla Normal	Jurásico temprano	Movimiento discontinuo: 0.202–0.423 mm/año. Tasas más altas: 1.846 mm/año.	Falla normal Ornon. early Tethyan rifting, Alpes Franceses
Van Arsdale (2000).	Falla inversa	Cretácico tardío	4.4 mm/año y un máximo de 6.2 mm/año	Zona sísmica de New Madrid (USA)
Peive (2006)			Zona Fractura de Romanche: subsidencia 0.2 mm/año. Zona Fractura de Vema: 0.2–0.3 mm/año.	Corteza oceánica en el centro del Atlántico
Giménez et al (2000).	Diferentes tipos dependiendo del perfil de nivelación: inversa.	Zonas externas: sedimentos del mesozoico al terciario. Zona interna: entre Paleozoico y terciario.	Zona Falla Valldigna-Jumilla (Alicante/Albacete): 2mm/a; Zona Falla Cocón-Terrerros (Murcia/Almería): 0.9mm/año; Zona cuenca Almería: -1.5mm/a; Falla Guadahortuna (Granada/Jaén): 1mm/año; Zona falla Cádiz–Alicante (cerca del área de Granada): 1mm/año; Costa ibérica del mar de Alborán (zona Almería/Granada): 1.4mm/año.	Este de la Cordillera Bética
Song et al. (2004).			Desde el Pleistoceno medio: 0.74-0.76 mm/a, Desde el Pleistoceno tardío: 0.1-0.35 mm/a.	Zona de la Falla Youjiang (Guixi, Oeste de Guangxi).
Hippolyte et al (2006).	Fallas inversas y normal: sackung escarpes?.		tasa vertical: 1.4±0.1 mm/año	Oeste de los Alpes (Francia)
Lagios et al (2007).			-2.6±1.8 mm/año compatible con (sobre -4 mm/año determinados por Hollenstein et al.	Cefalonia

Referencia	Tipo Falla	edad	Tasa Vertical.	Zona Geológica
			(2006).	
Hollenstein et al (2006).			En el norte de la región del mar Ionian: -2 a -2.5mm/año, y en el sur del mar Ionian sea: de -3.5 a -4.5mm/año.	islas Ionian, oeste de Grecia
Stramondo et al (2007).			El área cerca del piedemonte del anticlinal Sabbiano: 2-5mm/año	Llanura del Po cuenca sedimentaria (área Bolonia).

Tabla 1: referencias de fallas activas.

1. Jan Mrlina. (2000). Vertical displacements in the Novy Kostel seismoactive Area. *Studia geoph. Et geod.* 44 (2000), 336-345
2. P. Vyskocil, A. Zeman, A. Tealeb, S. M. Mahmoud and G. S. El-Fiky. (1992). Vertical movements around the Kalabsha fault, Northwest of Aswan lake, from precise levelling. *J. Geodynamics* vol. 14, nos 1-4, pp. 249-262.
3. J. Giménez García. (2001). Quantification of recent deformations in the eastern part of Iberian peninsula using high precision levelling data. *Acta Geologica Hispánica*, v. 36 (2001), nº 1-2, p. 21-51
4. F. Chevalier, M. Guiraud, J.-P. Garcia, J.-L. Dommergues, D. Quesne, P. Allemand and T. Dumont. (2003). Calculating the long-term displacement rates of a normal fault from the high-resolution stratigraphic record (early Tethyan Rifting, French Alps). *Terra Nova*, Vol 15, No. 6, 410-416
5. R. Van Arsdale. (2000). Displacement history and slip rate on the Reelfoot fault of the New Madrid seismic zone. *Engineering Geology* 55 (2000) 219-226
6. A. A. Peive. (2006) Vertical Tectonic Movements of the Crust in Transform Fracture Zones of the Central Atlantic. *Geotectonics*, 2006, Vol. 40, No. 1, pp. 25-36.
7. J. Giménez, E. Suriñach, X. Goula. (2000). Quantification of vertical movements in the eastern Betics (Spain) by comparing levelling data. *Tectonophysics*, 317 (2000) 237-258
8. Song, F.-M., Li, C.-Y., Chen, X.-C., Zhang, L.-F. (2004). Geologic-geomorphic evidence and rate of late Pleistocene displacement of the Youjiang Fault zone. *Dizhen Dizhi* Vol. 26, Issue 4, Dec. 2004, P 620-628
9. J-C Hippolyte, G. Brocard, M. Tardy, G. Nicoud, D. Bourlès, R. Braucher, G. Ménard, B. Souffaché. (2006). The recent fault scarps of the Western Alps (France): Tectonic surface ruptures or gravitational sacking scarps? A combined mapping, geomorphic, levelling, and ¹⁰Be dating approach. *Tectonophysics* 418 (2006) 255-276
10. E. Lagios, V. Sakkas, P. Papadimitriou, I. Parcharidis, B.N. Damiata, K. Chousianitis, S. Vassilopoulou. (2007). Crustal deformation in the Central Ionian Islands (Greece): Results from DGPS and DInSAR analyses (1995-2006). *Tectonophysics* 444 (2007) 119-145

11. Ch. Hollenstein, A. Geiger, H.-G. Kahle and G. Veis. (2006). CGPS time-series and trajectories of crustal motion along the West Hellenic Arc. *Geophys. J. Int.* (2006) 164, 182–191
12. S. Stramondo, M. Saroli, C. Tolomei, M. Moro, F. Doumaz, A. Pesci, F. Loddo, P. Baldi, E. Boschi. (2007). Surface movements in Bologna (Po Plain - Italy) detected by multitemporal DInSAR. *Remote Sensing of Environment* 110 (2007) 304–316.

Referencia	Tipo de Subsistencia	Tasas Verticales	Zona Geológica
S. Stramondo et al, 2007.	Causa antrópica (efecto en superficie debido a la sobre explotación de los acuíferos)	entre 10 mm/a (parte histórica de la ciudad de Bolonia), y hasta 59 mm/a en el NE de las áreas industrial y agrícola	Cuenca sedimentaria de la llanura del Po, en particular el área de Bolonia.
C-S Hou et al, 2005	La comparación con la subsidencia Holoceno sugiere que el 75% de subsidencia actual resulta de la disminución del nivel de agua subterránea inducido por sobre bombeo, añadiendo una componente significativa a corto plazo al riesgo natural resultante de la subsidencia tectónica a largo plazo.	velocidades Verticales de +13 a -25 mm/año	Llanura del Pingtung. Suroeste de Taiwan.
C.P. Chang, et al, 2004	La tasa de subsidencia está asociada con la tendencia de descenso del nivel de agua	Máxima tasa de subsidencia: 3–6 cm/a en las partes alejadas del centro de la llanura de Pingtung. Este desplazamiento ocurre principalmente en la estación seca	Llanura de Pingtung Suroeste de Taiwan
Ma, R et al, 2006	Subsidencia tectónica es una de las causas pero no la principal. La subsidencia esta causada principalmente por la sobre explotación del agua subterránea de los acuíferos.	La tasa media de subsidencia de 63mm/a en 2003 se da en la localidad de Wujiabao.	Taiyuan, norte de China
Lanari et el, 2004	?	3mm/año	Ciudad de Nápoles, Italia
Strozzi et al, 2003	-extracción de agua subterránea. -explotación de agua subterránea para usos industrial, doméstico y agrícola	>40cm/año 6/8cm /año	-Ciudad de México. -Bolonia (Italia)
Teatini et al 2005	Asociado con elementos geológicos de la región de estudio: tectónica, sismicidad,	Centro del lago, incluyendo la ciudad de Venecia: estabilidad general; extremos N y	Región de Venecia (Italia).

Referencia	Tipo de Subsistencia	Tasas Verticales	Zona Geológica
	consolidación diferencial de depósitos del Pleistoceno medio-alto y Holoceno, y con actividades antrópicas, como la extracción de agua subterránea.	S del lago: 3- 5 mm/a. Los valores se incrementan hasta 10–15 mm/a en la zona de costa al sur del lago	
Zhou et al, 2003	Subsistencia debida a la extracción de agua subterránea.	Tasa de 50–80 mm/a.	Tianjin, (Golfo Bohai) China.
Tomas et al, 2005	Sobre explotación del acuífero	entre 1995–97, el periodo más dramático, la subsidencia excede los 20 mm, con valores de asentamiento de 5-10 mm/a.	Rio Segura River (SE España)

Tabla 2: referencias de Subsistencias

1. S. Stramondo, M. Saroli, C. Tolomei, M. Moro, F. Doumaz, A. Pesci, F. Loddo, P. Baldi, E. Boschi. 2007. Surface movements in Bologna (Po Plain - Italy) detected by multitemporal DInSAR. *Remote Sensing of Environment* 110 (2007) 304–316.
2. C-S Hou, J-C Hu, L-C Shen, J-S Wang, C-L Chen, T-C Lai, C Huang, Y-R Yang, R-F Chen, Y-G Chen, J Angelier. (2005) Estimation of subsidence using GPS measurements, and related hazard: the Pingtung Plain, southwestern Taiwan. *C. R. Geoscience* 337 (2005) 1184–1193.
3. C.P. Chang, T.Y. Chang, C.T. Wang, C.H. Kuo, K.S. Chen. (2004) Land-surface deformation corresponding to seasonal ground-water fluctuation, determining by SAR interferometry in the SW Taiwan. *Mathematics and Computers in Simulation* 67 (2004) 351–359
4. Ma, R., Wang, Y., Ma, T. (2006). The effect of stratigraphic heterogeneity on areal distribution of land subsidence at Taiyuan, northern China. *Environ Geol* (2006) 50: 551-568.
5. Lanari R., Zeni G., Manunta M., Guarino S., Berardino P. and Sansosti E. 2004. An integrated SAR/GIS approach for investigating urban deformation phenomena: a case of study of the city of Naples, Italy. *Int. J. Remote Sensing*, 20 July, 2004 vol 25, nº14, 2855-2862.
6. Strozzi T., U. Wegmüller, C. L. Werner, A. Wiesmann, V. Spreckels .JERS SAR Interferometry for Land Subsidence Monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 7, July 2003, pp 1702-1708.
7. Teatini P., L. Tosi, T. Strozzi, L. Carbognin, U. Wegmüller, F. Rizzetto. 2005. Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system. *Remote Sensing of Environment* 98 (2005) 403 – 413.
8. Zhou, Y., Stein, A. and Molenaar, M. (2003) 'Integrating interferometric SAR data with levelling measurements of land subsidence using geostatistics', *International Journal of Remote Sensing*, 24:18, 3547 - 3563

9. Tomás R., Y. Márquez, J. M. Lopez-Sanchez, J. Delgado, P. Blanco, J.J. Mallorquí, M.Martínez, G. Herrera, J. Mulas. 2005. Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of Environment* 98 (2005) 269 – 283.

10.3.-ANEXO 3: ETAPAS DE LA FASE GENERAL DInSAR REALIZADAS CON EL PROGRAMA DIAPASON PARA EL CÁLCULO DE LOS INTERFEROGRAMAS DIFERENCIALES

1. EXTRACCIÓN DE LAS IMÁGENES

Se realiza la extracción de las imágenes con la compresión 10 a 2 por lo que el tamaño de píxel será de 40x 40 metros.

La extracción se realiza con un script, seguido del nombre de la órbita de la imagen, la fecha y el sensor, es decir:

Esta operación se realiza para cada una de las imágenes. Ejemplo:

```
extract_concat_dpmtv.sh 20308 19950603 ERS1
```

En cada uno de estos scripts hay que fijar un parámetro importante que es el gain que nos controlará si la imagen resultante de la extracción tiene saturación o no en el blanco, es decir que controla el histograma espectral de la imagen.

Por eso es necesario abrir cada una de las imágenes con el ENVI tras su extracción para comprobar si el valor de gain con el que se han extraído es correcto y sino, realizar una nueva extracción con otro valor diferente de ganancia. Los valores de gain con los que se han extraído las imágenes son de 0,7 y 0,8. Excepciones:

- a. Dos imágenes descendentes (12449 y 22312) que se han extraído con valores muy bajos de ganancia (0.075 y 0.045 respectivamente).
- b. Dos imágenes ascendentes (10352 y 26594) que se han extraído con valores de ganancia de 0.9 y 0.6 respectivamente.

2. CÁLCULO DE LAS ÓRBITAS PRECISAS.

La primera vez que se usa DIAPASON, es necesario crear un directorio y dentro una serie de subcarpetas y descargar todos los ficheros relacionados con el sensor (ERS1 ERS2 o ENVISAT) de nuestras imágenes. Las órbitas precisas utilizadas son las calculadas por la Universidad de Delf, disponibles en la dirección: <http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/orbits/> al directorio que se ha creado. Debe de descargarse en el directorio correspondiente y actualizar los ficheros descargados periódicamente.

- Creación del script para obtener las orbitas precisas. Para determinar el tiempo de adquisición entre todas las imagenes, primero debemos de encontrar el tiempo mínimo y máximo de la adquisición del conjunto de

las imágenes. Seguidamente redondearemos el segundo las cifras resultantes de forma que el tiempo mínimo lo redondearemos a la baja, o por defecto y el tiempo máximo lo redondearemos al alza o por exceso.

- Cálculo de las coordenadas espaciales precisas lanzando el script creado: comprobamos todos los ficheros de salida para ver que no hay ningún error, ya que es frecuente que éstos aparezcan.
- Cálculo de los vectores de estado de cada órbita (*state vectors*).
- Cálculo de la ambigüedad en la altitud (*Alt ambiguity*): Se trata de un cálculo necesario para, tras la realización de los interferogramas, realizar la selección de los mismos. De todos los interferogramas que se generen seleccionaremos los que vamos a utilizar en base a dos criterios. La base perpendicular y el incremento de tiempo. Para realizar el cálculo de la base perpendicular necesitamos conocer la ambigüedad de altitud, que nos mide físicamente la distancia entre una franja del interferograma y la siguiente igual, (es decir la distancia en metros desde la franja roja hasta la siguiente franja del mismo color del interferograma, por ejemplo). Se usa para conocer el ángulo de incidencia y la ambigüedad de altitud. Para ello se utiliza un script.

3. ADAPTACIÓN DEL DEM A LAS ELABORACIONES

4. CÁLCULO DE LA IMAGEN SUPERMÁSTER

En este proceso lo que se realiza es lo siguiente:

- partir de los parámetros groseros de la órbita R_0 y t_0 , simula una nueva imagen de la supermaster y la compara con la multilook de la supermaster, sacando así unos nuevos parámetros precisos R y t .

-el segundo paso lo que hace es realizar una nueva imagen con estos nuevos parámetros que será la resultante del proceso.

Al terminar abrimos las dos imágenes resultantes calculadas con el ENVI y realizamos una comparación de la multilook inicial de la supermaster con las dos imágenes calculadas para ver que grado de coincidencia tienen.

Las imágenes extraídas no tienen todas el mismo tamaño, con lo que tenemos que localizar la más pequeña y copiar sus valores en el resto de las imágenes, modificando varios archivos:

Esta fase es muy importante y delicada por lo que la comprobación del ajuste de las imágenes es vital. En ambos casos (imágenes descendentes y ascendentes) el ajuste

no se realizó adecuadamente de forma automática, por lo que se tuvo que recurrir a realizar un ajuste manual muy delicado y bastante costoso en tiempo.

5. CORREGISTRACIÓN DE LAS IMÁGENES

Se realiza a partir de la supermáster calculada. Consiste en poner todas las imágenes en la misma geometría.

Se crea un fichero con el listado de las órbitas, la primera de todas es la de la supermáster. La siguiente es ella misma, para que realice la corrección con ella misma y posteriormente todas las demás sin necesidad de que estén en orden.

Se realiza ejecutando un script. Hay que tener en cuenta el directorio de trabajo y el directorio donde se almacenarán los ficheros resultantes.

Tanto en el caso de las imágenes descendentes como en la ascendentes las que habían sido extraídas con valores de ganancia diferentes al la mayoría de la imágenes del paquete se corrigieron de forma independiente al resto, para evitar errores y poder comprobar si estos valores afectaban en este paso. Se superó el paso satisfactoriamente tras varios controles.

6. CALCULO DE PARAMETROS DE LA RED DE INTERFEROGRAMAS A CREAR.

En este paso se realizan el cálculo de conexión de la red de interferogramas a crear y utilizar en la Fase Específica y la Redundancia del conjunto, de forma que las imágenes que intervienen en la generación del paquete de interferogramas lo hagan en varios y como Maestra y Esclava.

Es en este paso en el que se deciden que interferogramas de todos los posibles se van a crear estableciendo unos límites para la base perpendicular y la diferencia temporal de las dos imágenes que lo forman. Para el caso de la imágenes descendentes se decidió la opción de b perpendicular < 380 y $At < 2200$. Para el caso de las imágenes ascendentes opción elegida fue b perpendicular < 400 y $At < 2200$.

Una vez seleccionados los interferogramas se comprobó que la red de interferogramas es conexa. Para ello se estudió qué imágenes intervienen en la realización de los interferogramas que cumplen los dos criterios de base perpendicular y At y en cuántos intervienen.

Después se calculó para cada trayectoria la redundancia de los interferogramas para comprobar que la red era robusta. Los valores (van desde 0 a 1) más próximos a 1 son los de mejor redundancia. En el caso de los descendentes el valor de redundancia más

bajo es de 0,626 y los valores se encuentran entre 0,626 y 0,865, lo cual se aceptó como suficientemente redundante. En el caso ascendente el valor de redundancia más bajo es de 0,537 y los valores se encuentran entre 0,537 y 0,807. También se consideró aceptable.

7. CREACIÓN DE LOS INTERFEROGRAMAS

Una vez comprobado que todos los interferogramas seleccionados del total forman una red robusta y conexas se pasó a su cálculo.

Para el cálculo de los interferogramas se necesitan una serie de ficheros y la ejecución de un programa.

Para cada interferograma genera una carpeta en la carpeta cuyo nombre es: int<número de interferograma>(órbitamáster-órbitaslave)DT<incremento de tiempo entre ambas imágenes> , por ejemplo: int004(12449-22312)DT689. En cada una de las carpetas se almacenan 4 archivos:

- pha_int<número de interferograma>_<incremento de tiempo entre ambas imágenes>_ml<tamaño de la multilook>w<tamaño de la ventana de cálculo>.rad
- pha_int<nºinterf>_<incr.tiempoentreimágenes>_ml<tamañomultilook>w<tamaño o ventana cálculo>.pha
- coh_int<nºinterf>_<incr.tiempoentreimágenes>_ml<tamañomultilook>w<tamaño o ventana cálculo>.rad
- coh_int<nºinterf>_<incr.tiempoentreimágenes>_ml<tamañomultilook>w<tamaño o ventana cálculo>.oct

que se corresponden con la imagen fase (es el interferograma) y la amplitud (es la coherencia) de cada imagen y sus cabeceras.

Por ejemplo: para el interferograma 004:

- pha_int004_689_ml102w102.pha
- pha_int004_689_ml102w102.rad
- coh_int004_689_ml102w102.rad
- coh_int004_689_ml102w102.oct

El cálculo de cada interferograma requirió un tiempo aproximado de 3 horas.

10.4.-ANEXO 4: PUBLICACIONES DE LA DOCTORANDA

1. Crosetto, M., Crippa, B., Biescas, E., Monserrat, O. Agudo, M. **Fernández, P.** 2005. “Land deformation measurement using SAR interferometry: state-of-the-art”. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*. Volumen: 06-2005. pp 497-510. Stuttgart (Germany) ISSN: 1432-8364/05/2005/0497.
2. **P. Fernández**, J. Jiménez, T. Fernández, C. Irigaray, R. El Hamdouni, M. Crosetto, J. Chacón. 2006 “First results on DInSAR assessment of landslides activity in the Guadalfeo river valley (Granada, South of Spain)”. Revista: Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 06666, 2006 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-06666 © European Geosciences Union GRA Print: ISSN 1029-7006 GRA Online: ISSN 1607-7962
3. **Fernández Oliveras, P.** Irigaray Fernández, C., Fernández del Castillo, T., El Hamdouni Jenoui, R., Jiménez Peralvarez, J., Chacón Montero, J. 2006. “Aplicación de las técnicas de teledetección radar de interferometría diferencial al análisis de los movimientos de ladera”. Actas congreso nacional de tecnologías de la información geográfica. Universidad de Granada. Año de edición: 2006. ISBN: 84-338-3944-6.
4. **Fernández, P.**, J. Jimenez, R. EL Hamdouni, C. Irigaray, M. Crosetto, J. Chacon. 2007. “Application of differential SAR interferometry to the assessment of landslide activity in the Guadalfeo River Basin (Granada, Spain)”. Actas de la 7 Setmana Geomàtica: High resolution sensor and their applications. Instituto Cartogràfic de Catalunya, Institut de Geomàtica. Depósito Legal: B-9432-2007.
5. **Fernández, P.** Irigaray, C.; El Hamdouni, R.; Jiménez, J.; Crosetto, M.; Chacón, J. 2007. “DInSAR interferometry of RADAR satellite images: quantitative assessment of vertical ground deformations in the Guadalfeo River Valley and Metropolitan Area (Granada, South of Spain)”. Proceedings Book of the XXIII International Cartographic Conference ICC 2007. Moscú (Rusia).

6. **Fernández Oliveras, Paz**; Jiménez Perálvarez, Jorge; Fernández Del Castillo, Tomás; El Hamdouni Jenoui, Rachid; Irigaray Fernández, Clemente y Chacón Montero, José. 2007. "Primeros resultados sobre determinación de movimientos verticales en terrenos de la provincia de Granada mediante análisis de interferometría diferencial de RADAR (DInSAR)". Libro de actas del IV Congreso Andaluz de Carreteras. ISBN: 978-84-89875-73-9.
7. Autor/es: **Fernandez, P.**; Irigaray, C.; Jiménez, J.; El Hamdouni, R.; Crosetto, M.; Monserrat, O.; Chacon, J. 2009. "First delimitation of areas affected by ground deformations in the Guadalfeo River Valley and Granada metropolitan area (Spain) using the DInSAR technique". *Engineering Geology*, 105 (2009) 84–101 doi:10.1016/j.enggeo.2008.12.005.