



**FACULTAD DE
INGENIERIA**



**Secretaría de Ciencia, Técnica y Posgrado
Universidad Nacional de Cuyo**

Título del Proyecto:

**Construcción de series temporales de deformación
mediante imágenes SAR ascendentes y descendentes,
sobre la Ciudad de Mendoza y alrededores.**

**Código de Proyecto:
06/B131**

Informe Final

01/05/2007 AL 30/06/2009

Secretaría de Ciencia, Técnica y Posgrado Universidad Nacional de Cuyo

Título:

Construcción de series temporales de deformación mediante imágenes SAR ascendentes y descendentes, sobre la Ciudad de Mendoza y alrededores.

Código: 06/B131

Informe Final

01/05/2007 AL 30/06/2009

DATOS DEL PROYECTO:

Denominación del Proyecto: Construcción de series temporales de deformación mediante imágenes SAR ascendentes y descendentes, sobre la Ciudad de Mendoza y alrededores.

Director: Dr. Pablo Andrés Euillades

Breve descripción del Proyecto:

La deformación de la corteza terrestre se puede deber a diferentes fenómenos naturales o inducidos, tales como sismos, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierras (aluviones), etc. Esta deformación puede ser medida mediante diversas técnicas, en su mayoría complementarias. Entre ellas se puede mencionar la detección de deformación utilizando sistemas GPS, mediante la instalación de estaciones continuas; y la utilización de imágenes de radar para la generación de mapas de deformación mediante la técnica Interferometría Diferencial.

En áreas sísmicamente activas como es la zona oeste de la Argentina, es importante conocer cuales son las zonas más propensas a sufrir mayores deformaciones, y de esta forma, poder planificar de una forma consistente el crecimiento futuro de las ciudades.

Una herramienta importante para la caracterización de la deformación superficial es provista por la tecnología satelital, a través de las técnicas denominadas en conjunto Interferometría diferencial (DInSAR). Dichas técnicas permiten, utilizando como insumo imágenes de radar de apertura sintética, construir mapas y series temporales de deformación.

El presente proyecto propone ampliar el trabajo que se viene realizando desde hace algunos años, que consiste en la adquisición y procesamiento de un conjunto de imágenes de los satélites ERS y ENVISAT (Agencia Espacial Europea), y cuyo objetivo es caracterizar los procesos de deformación actualmente en curso en la Ciudad de Mendoza y sus alrededores. El área de interés está centrada en la zona metropolitana de Mendoza y tiene una extensión aproximada de 100x100 km².

Es importante destacar que para caracterizar en forma completa los vectores de deformación es preciso contar con al menos dos conjuntos de imágenes que observen el área de interés desde puntos de vista distintos. Por esta razón, este proyecto propone completar un conjunto de imágenes de radar de apertura sintética, adquiridas en pasada ascendente y descendente, inédito en zonas urbanas de la Argentina, y procesarlo mediante una de las técnicas más avanzadas disponible, denominada SBAS (Small Baseline Subsets). Al momento de la finalización del proyecto se espera contar con un conjunto de 40 imágenes ENVISAT en pasada ascendente (período 2005-2009), con 20 imágenes ENVISAT en pasada descendente (período 2007-2009), y con un conjunto de aprox. 15 imágenes útiles adquiridas por el satélite ERS en pasada descendente (período 1996-2006).

Como resultado, se obtendrán mapas de deformación del área de interés, conteniendo componentes verticales y horizontales de la deformación. También se obtendrán series temporales de deformación para cada píxel coherente de las imágenes utilizadas. Resultados previos han permitido identificar distintos fenómenos de deformación actualmente en curso dentro del área de interés y postular algunos mecanismos causales: extracción/inyección de fluidos tales como petróleo y agua de riego, tectónica activa, y efectos estacionales relacionados con recarga y descarga de acuíferos subterráneos. Los nuevos resultados, obtenidos con un mayor número de imágenes, permitirán postular y ajustar modelos de deformación de la corteza terrestre que expliquen el comportamiento observado.

Equipo de Trabajo:

Modificaciones:

Modificación	Fecha	Nombre	Función	Dedicación
Baja*	01/03/2008	Axel Pedraza Salazar	Integrante Alumno	-----
Baja*	20/07/2007	Gabriel Cabrera	Integrante Alumno	-----
Alta	26/05/2008	Misael Meljem	Integrante Alumno	4 hs semanales
Alta	26/05/2008	Gabriel Sosa	Integrante Alumno	4 hs semanales

*Motivo de baja: transferencia a la actividad privada.

Evaluación del desempeño de los integrantes:

Nombre	Función	Desempeño
Mauro Blanco	Codirector	Satisfactorio
Leonardo Euillades	Integrante Becario CONICET	Satisfactorio
Axel Pedraza Salazar	Integrante Alumno	Satisfactorio
Gabriel Cabrera	Integrante Alumno	Satisfactorio
Federico Distéfano	Integrante Becario ICB	Satisfactorio
José Luis Vezzoni	Integrante Alumno	Satisfactorio
Misael Meljem	Integrante Alumno	Satisfactorio
Gabriel Sosa	Integrante Alumno	Satisfactorio

GRADO DE AVANCE DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS

1. Complementar el conjunto de imágenes ENVISAT disponibles sobre la zona de interés, mediante la adquisición de nuevas escenas en pasada ascendente y descendente del satélite.

Porcentaje de cumplimiento: 100%

Fundamentación: Se obtuvo la ampliación del proyecto de provisión de imágenes (Category-1 ID nº2857 de la Agencia Espacial Europea). Se obtuvieron las imágenes correspondientes al período de ejecución del proyecto a una tasa de una cada 35 días en pasada ascendente y una cada 35 días en pasada descendente. La falta de algunas fechas corresponde a modificaciones en la programación del satélite para tareas de mantenimiento o adquisiciones de mayor prioridad.

2. Mejorar los algoritmos utilizados para el procesamiento, reprogramando las rutinas de mayor peso computacional para hacerlo más eficiente.

Porcentaje de cumplimiento: 100%

Fundamentación: Se rediseñaron e implementaron mejoras en varios puntos de la cadena de procesamiento, citadas a continuación:

- Algoritmos de geolocalización de la imagen de radar.
- Algoritmos de transformación de coordenadas geográficas a sistema local de la imagen.
- Algoritmos de desenrollado de fase.
- Algoritmos específicos para procesar imágenes de los satélites ERS posteriores a la rotura del sistema de navegación de los mismos

3. Obtener mapas y series temporales de deformación del área de interés a partir de las imágenes ENVISAT adquiridas, minimizando las fuentes de error, tales como decorrelación y efectos atmosféricos.

Porcentaje de cumplimiento: 100%

Fundamentación: Ver Resultados (puntos 2 y 3).

4. Caracterizar las componentes horizontales y verticales de los vectores de deformación dentro del área de interés.

Porcentaje de cumplimiento: 100%

Fundamentación: Ver Resultados (punto 4)

5. Validar los mapas de deformación utilizando datos GPS.

Porcentaje de cumplimiento: 100%

Fundamentación: se ha implementado el algoritmo que proyecta los resultados GPS en línea de vista del radar para su posterior comparación. Se ha implementado la metodología de transformación de coordenadas geodésicas (latitud, longitud, altura) a coordenadas de imagen de radar (azimuth, rango), que permite localizar una estación GPS en el espacio de la imagen. Estas tecnologías constituyen la base del algoritmo de comparación entre series temporales de deformación obtenidas con GPS y con imágenes de radar y cuyos resultados se describen en Resultados: punto 7.

DIFICULTADES ENCONTRADAS

En general no se presentaron dificultades de importancia. Sin embargo, fue necesario realizar un reclamo a la Agencia Espacial Europea, ya que una serie de imágenes adquiridas durante 2008 resultaron estar desplazadas unos 30 km hacia el norte. Esto impidió realizar el procesamiento que incluía dicho año. El reclamo está en este momento siendo tramitado por la ESA, y en cuanto sea resuelto y se nos entreguen las imágenes corregidas se realizará dicho procesamiento.

TRANSFERENCIA REALIZADA

Durante el período se publicaron los siguientes trabajos relacionados con el proyecto:

- 1) Euillades, P., Euillades, L., Blanco, M., “*Deformación superficial actual de carácter local en el Gran Mendoza: resultados obtenidos mediante procesamiento SBAS de imágenes ENVISAT*”, Desarrollos e Investigaciones Científico – Tecnológicas en Ingeniería, EnIDI 2007, Mendoza, 2007, pp. 357-364. ISBN 978-950-42-0087-1
Este trabajo fue presentado en las EnIDI 2007, 16, 17 y 18 de Octubre de 2007.
- 2) Euillades, L., Blanco, M., Pepe, A. y Euillades, P., “*SBAS-DInSAR Surface Deformation Analysis of the Mendoza Region (Argentina) by Using ENVISAT ASAR Data*”, resumen disponible en la página web de la Agencia Espacial Europea: <http://earth.esa.int/cgi-bin/confFRINGE07.pl?abstract=484>
Este trabajo fue presentado en la Poster Session del Fringe 2007 Workshop, realizado en Frascati (Roma) en Noviembre de 2007.
- 3) M. H. Blanco, P.A. Euillades & G. A. Sosa, “*Análisis de la deformación elástica producida por la carga de agua en el dique potrerillos*”, Desarrollos e Investigaciones Científico – Tecnológicas en Ingeniería, EnIDI 2008, Mendoza, 2008.
- 4) Pablo Andrés Euillades, “*Imágenes satelitales de radar, aplicaciones en geodinámica, actualidad y perspectivas*”, Anales de la Academia Nacional de Ingeniería, en prensa.
Este trabajo fue presentado en forma de conferencia el 19 de junio de 2008, en la sesión extraordinaria de la Academia Nacional de Ingeniería convocada para entregar el premio Ing. Antonio Marin (Edición 2007) al Dr. Pablo Euillades.

Se presentaron los siguientes trabajos en congresos y reuniones científicas:

- 5) Factibilidad del uso de imágenes ERS para estudios de deformación superficial mediante interferometría diferencial: aplicación en el área Mendoza. Autores: Pablo Euillades, Mauro Blanco, Leonardo Euillades, Federico Distéfano, Axel Pedraza Salazar y José Luis Vezconi. Presentado en el III Encuentro Internacional del ICES-3, realizado durante el mes de noviembre de 2007 en la ciudad de Malargüe, Mendoza.

- 6) Monitoring crustal deformation in Mendoza region with ENVISAT data and SBAS. Autor: Pablo Euillades. Presentado en el Joint CONAE-NCEO Workshop on Advances Earth Observation Applications Development, 8-11 de Octubre de 2007, Buenos Aires.
- 7) P. A. Euillades, “Interferometría diferencial mediante imágenes ERS en la Argentina: estudio de factibilidad”, XXI Jornadas de Investigación y III Jornadas de Posgrado de la Universidad Nacional de Cuyo, 7 de mayo de 2008.
- 8) F. Distéfano, “Determinación de componentes de deformación cortical verticales y horizontales a partir de imágenes satelitales de radar”, XXI Jornadas de Investigación y III Jornadas de Posgrado de la Universidad Nacional de Cuyo, 7 de mayo de 2008.
- 9) P.A. Euillades, M. Blanco y L. Euillades, “Caracterización de fenómenos deformativos mediante imágenes de radar: potenciales aplicaciones en el campo petrolero”, Actas en CD de las III Jornadas de Geotecnología, VII Congreso de Exploración de Hidrocarburos, pp. 1-10, 2008.

Además, se hallan disponibles los informes de avance correspondientes al proyecto Category 1 ID n° 2857, financiado por la Agencia Espacial Europea, y en virtud del cual se adquieren las imágenes del satélite ENVISAT. El último informe tiene fecha de Agosto de 2007 y puede accederse a través de la página web: <http://eopi.esa.int>

FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

El presente proyecto constituye la base técnica de las siguientes actividades de formación de recursos humanos:

Formación Superior:

- 1) Realización de la carrera de Doctorado en Ingeniería. Doctorando: Ing. Mauro Blanco. Tema: “Deformación de la corteza terrestre debido a movimiento de placas tectónicas y otros fenómenos.”
- 2) Realización de la carrera de Doctorado en Ingeniería: Doctorando: Ing. Leonardo Euillades. Tema: “Diseño, desarrollo e implementación de algoritmos para el procesamiento de imágenes de radar utilizando técnicas de computación paralela.”

Becas:

- 1) El Ing. Leonardo Euillades es beneficiario de una beca de formación de posgrado tipo II de CONICET a partir del 1/4/2008 (duración: 2 años). Se adjunta probanza.

- 2) El alumno Federico Distéfano obtuvo una Beca de Investigación del Instituto de Ciencias Básicas de la U. Nac. De Cuyo (Disp. N° 09/07-D), a partir del 1 de marzo de 2008 y con una duración de 6 meses. Tema: “Determinación de componentes de deformación cortical verticales y horizontales a partir de imágenes satelitales de radar”. Se adjunta probanza y certificado de aprobación del informe final.

Pasantías:

- 1) El Ing. Leonardo Euillades realizó una estadía de trabajo en el IREA – CNR (Nápoles, Italia) entre el 6/2/2007 y el 20/12/2007. Tema: Análisis de deformación superficial de la ciudad de Mendoza y Desenrollado de fase de secuencias de interferogramas. Se adjunta probanza.
- 2) El Ing. Leonardo Euillades realizó una segunda estadía de trabajo en el IREA-CNR, a partir del 20/04/2008 y por un período de 6 meses. Tema: Adaptación de algoritmos de procesamiento SBAS para procesar imágenes del satélite Radarsat. Se adjunta carta de invitación.

RESULTADOS

A continuación se resumen los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto.

- 1) Ampliación del Proyecto Category-1 ID n° 2857 (Agencia Espacial Europea) para obtención de imágenes de radar adquiridas por el satélite ENVISAT.
En el informe de avance de dicho proyecto, presentado con fecha de Agosto de 2007, se solicitó una ampliación de la cuota de imágenes a adquirir sobre el Área de Interés. Dicha ampliación fue aprobada por la ESA y al momento presente se continúa con la adquisición de imágenes.
En el Anexo I* al presente informe se adjunta el informe de avance.
- 2) Se construyeron mapas y series temporales de deformación del Área de Interés, mediante procesamiento SBAS de imágenes ENVISAT IS4 (pasada ascendente) entre 2005 y 2008.
Dichos mapas han permitido identificar ocho zonas donde la velocidad media de deformación tiene un comportamiento que merece atención. Las mismas corresponden con la Ciudad de Mendoza, el Dique Potrerillos, el cauce del Río Mendoza, las localidades de Cruz de Piedra y Carril Barrancas, el yacimiento Barrancas y la Zona agrícola ubicada al Oeste de Corralitos.
Estos resultados fueron publicados oportunamente (ver Transferencia Realizada). Para un mayor detalle de los mismos, se adjuntan los trabajos completos en el Anexo II* del presente informe.
- 3) Se construyeron mapas y series temporales de deformación del Área de Interés, mediante procesamiento SBAS de imágenes adquiridas por los satélites ERS 1 y 2. (pasada descendente)
Este punto tiene varios aspectos destacables: 1) existe una buena cantidad de imágenes ERS del área de interés entre 2000 y 2006, que permiten estudiar un

período de tiempo no cubierto por las adquisiciones ENVISAT (ver resultado anterior); 2) Debido a la rotura de un giróscopo del satélite ERS2 en 2001, la mayor parte de las imágenes posteriores a esa fecha no se pueden procesar con técnicas tradicionales.

Para aprovechar el potencial de estas imágenes se desarrolló una extensión de las técnicas de procesamiento tradicionales, que permite incluir la mayor parte de ellas. Esto constituye un avance importante no solo en el contexto del presente proyecto, ya que la Argentina cuenta con disponibilidad de imágenes ERS posteriores a 2000 en todo su territorio.

Una versión preliminar del desarrollo realizado fue presentada en el E-ICES-3 (ver Transferencia Realizada – se adjunta resumen como Anexo III*), y actualmente se está preparando un trabajo completo para publicación en una revista internacional (IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters).

- 4) Se avanzó en el planteo de la descomposición de la deformación observada en componentes horizontales y verticales. Este tema fue objeto de una beca de iniciación en la investigación otorgada por el Instituto de Ciencias Básicas al alumno Federico Distéfano, cuyo informe final se adjunta como Anexo IV*.

Se comprobó que en el caso del Área de Interés pertinente a este proyecto, el sentido de la deformación es principalmente vertical. Esta afirmación se apoya en dos observaciones:

1. Los desplazamientos medidos con tecnología GPS, que es sensible a movimientos horizontales antes que verticales, indican desplazamientos relativos del orden de 5mm/año dentro del área de interés. Estas magnitudes son prácticamente indiscernibles mediante interferometría, ya que están en el umbral de detección del método.
2. Los mapas de velocidad de deformación medidos con imágenes ENVISAT en pasada ascendente muestran la misma distribución de zonas de deformación positiva y negativa que los calculados con imágenes ERS en pasada descendente. Esta situación se da cuando la deformación es vertical, ya que las zonas de deformación horizontal significativas tienen signos opuestos en pasadas complementarias.

- 5) Se avanzó en la postulación de mecanismos causales que expliquen los fenómenos de deformación observados. Dado que la mayoría de las zonas identificadas están ubicadas a lo largo del cauce del Río Mendoza, se estudió su relación con variaciones de nivel de agua en los acuíferos superficiales asociados al mismo. Para ello se utilizaron datos de niveles estáticos proporcionados por el Instituto Nacional del Agua y series temporales de volúmenes y erogación del Dique Potrerillos, proporcionados por el Departamento General de Irrigación.

En general, se observa una buena correlación entre las series de deformación superficial y las variaciones de nivel en el acuífero, correlacionadas a su vez con períodos de llenado y máxima erogación del Dique Potrerillos. La fundamentación detallada se adjunta en el anexo V* del presente informe.

El análisis y resultados será objeto de una publicación internacional, actualmente en preparación.

- 6) En la misma línea del punto anterior, se implementó un modelo de cálculo de deformación cortical por cargas superficiales. El mismo permite caracterizar el

vector de deformación en sus tres componentes: este-oeste, norte-sur y vertical, producido por una carga superficial ubicada a una distancia conocida del punto de cálculo.

El modelo fue utilizado para calcular el campo de deformaciones producido por las variaciones de volumen del dique Potrerillos. Esto constituye el paso previo a un estudio detallado de los patrones deformativos lindantes con el lago, que pueden ser observados en el anexo II*.

Como resultado se estimó una deformación máxima vertical del orden de los 6 mm en las cercanías del lago, mientras que las componentes horizontales no superan los 2 mm en el mismo punto. Estos valores no alcanzan a explicar la magnitud de la deformación observada mediante imágenes de radar, debido a lo cual es necesario introducir nuevas hipótesis.

Los resultados detallados y una descripción completa del modelo utilizado fueron publicados oportunamente (ver transferencia realizada). Se adjunta el trabajo como anexo VI*.

- 7) Se realizó un análisis comparativo entre las series de deformación mencionadas en el punto 2 de Resultados, y series temporales de deformación medidas con CGPS en 7 puntos dentro del área procesada. Dado que varias de las estaciones CGPS fueron instaladas después de 2005, no todas las series muestran una completa superposición temporal.

El acuerdo entre deformaciones medidas con ambas tecnologías es en general bueno en las series en que la superposición es completa (3 en total). En las 3 series restantes, la deformación estimada a partir de imágenes de radar presenta en general una mayor amplitud que su homóloga obtenida con CGPS. Estas series coinciden con ser también las más alejadas del punto de referencia (ubicado en la Cdad de Mendoza), lo cual introduce errores en la solución obtenida mediante imágenes.

Se concluye que es probable una degradación de la solución obtenida mediante SBAS al alejarse del punto de referencia, aunque la escasa superposición entre los datos InSAR y GPS no permiten un análisis más detallado aún.

Se incluye como anexo VII* el documento donde pueden verse los gráficos de deformación y la ubicación de las estaciones de GPS.

- 8) Se han implementado mejoras en el software utilizado:
 - a. Se diseñó e implementó una metodología de transformación de coordenadas geodésicas (latitud, longitud, altura) a coordenadas de imagen de radar (azimuth, rango), que permite localizar una estación GPS en el espacio de la imagen. Estas tecnologías constituyen la base del método de comparación de series de deformación obtenidas mediante GPS y series de deformación obtenidas mediante imágenes de radar. Se adjunta memoria descriptiva en el anexo VIII*.
 - b. Se detectó la existencia de un error en el algoritmo de transformación de coordenadas SAR (tiempo, rango) a coordenadas geográficas (latitud, longitud). Originalmente, este algoritmo no tenía en cuenta la altura del punto transformado, lo cual producía errores de geolocalización muy notables en terreno escarpado. Este error fue solucionado de manera satisfactoria, incluyendo una modificación en el algoritmo de geolocalización para que se tome en cuenta la altura al realizar la

transformación. En el anexo VIII* se incluye una explicación detallada de la naturaleza del problema encontrado.

*Los anexos citados, dada su extensión, se incluyen en la versión electrónica del presente informe.

TRABAJO A FUTURO

El presente proyecto ha sentado bases para lanzar varias líneas de investigación que encuentran su sustento en la comprensión de los fenómenos de deformación de la corteza terrestre observados.

La primera de ellas es la que pretende profundizar el análisis de la relación entre deformación cortical y dinámica de acuíferos. Esta línea de investigación incluye la recopilación de más y mejores datos hidrológicos, así como la continuidad de adquisición y procesamiento de imágenes SAR.

La segunda de ellas tiene en cuenta la faceta de modelado geológico de la deformación. Es una importante rama de la geología, a la cual no existen muchos centros en la Argentina que se dediquen.

La tercera de ellas incluye el refinamiento del análisis ya realizado mediante procesamiento interferométrico diferencial para incluir el cálculo en alta resolución. Esto permitirá el análisis de desplazamiento en estructuras civiles singulares, tales como el dique Potrerillos, pudiendo convertirse en una herramienta de monitoreo de gran importancia.

Todas estas líneas de investigación serán continuadas en el marco de la convocatoria a financiamiento de proyectos hecha por la Sectyp para el bienio 2009-2011.