

III. PREMIOS

**ENTREGA DEL PREMIO “ING. ANTONIO MARÍN” EDICIÓN 2007
AL DR. ING. PABLO A. EUILLADES**

19 de junio de 2008

I. Palabras de apertura a cargo del señor Presidente de la Academia Nacional de Ingeniería, Ing. Arturo J. Bignoli.

II. Presentación del premiado por el señor Académico de Número, Ing. Manuel A. Solanet.

III. Conferencia del Dr. Ing. Pablo A. Euillades sobre el tema: “Imágenes Satelitales de Radar: Aplicaciones en Geodinámica, Actualidad y Perspectivas”.

**ENTREGA DEL PREMIO “ING. ANTONIO MARÍN” 2007
AL DR. ING. PABLO A. EUILLADES**

19 de junio de 2008

**Palabras de apertura a cargo del Presidente de la Academia
Nacional de Ingeniería, Ing. Arturo J. Bignoli**

Buenas tardes, Señoras y Señores.

Vamos a iniciar este acto, en el que se entregará el Premio “Ing. Antonio Marín” al Ing. Pablo Euillades. Hace unos instantes le contaba al Ing. Euillades que cuando hacemos un acto para entregar un premio a un ingeniero valioso y destacado, como lo es él, pero que pertenece a una provincia que casi se cae al Océano Pacífico como lo es Mendoza, en general no asiste gran cantidad de público; sí en cambio cuando el premiado es de esta ciudad de Buenos Aires o de alguna localidad cercana, y más si es profesor, ya que vienen todos sus alumnos. No obstante esta particularidad, no será éste un acto frío, ya que reconocer las virtudes de un joven ingeniero le da a esta ceremonia un valor emocional que nos hace pensar en un futuro venturoso para nuestro país.

Cada vez que entregamos este premio, rendimos homenaje a nuestro primer Presidente, ingeniero Antonio Marín. Habiendo sido profesor en la Facultad, manifestaba una gran preocupación por saber qué hacían, qué estudiaban, por qué se interesaban los ingenieros jóvenes. Fue así que, después de su partida, la Academia Nacional de Ingeniería instituyó este premio, con un límite de edad de 40 años, para destacar a los mejores entre los jóvenes. Hago notar que al Ing. Euillades le falta bastante para llegar a los cuarenta y estoy seguro de que cuando esto ocurra, habrá recibido muchos reconocimientos más.

Esperamos con gran interés la disertación del Ing. Pablo Euillades, para enterarnos de las complejas tareas que desarrolla.

Como verán, hoy mi función es muy sencilla, solamente he abierto el acto. Agradezco a las personas que hoy nos acompañan y entonces voy a felicitar y a entregar al Ing. Euillades el diploma y la medalla que lo acreditan como receptor de este tan merecido premio.

Presentación del Dr. Ing. Pablo A. Euillades a cargo del señor Académico de Número de la Academia Nacional de Ingeniería, Ing. Manuel A. Solanet

Me alegra mucho presentar al Ingeniero y Doctor en Ingeniería Pablo Euillades, que ha merecido holgadamente el premio Antonio Marín del año 2007. Y lo digo con plena convicción, merecidamente. Este premio se da todos los años, se convoca a las distintas universidades, Facultades de Ingeniería del país, a otras entidades que tengan relación con la profesión a presentar candidatos; candidatos que deben cumplir ciertos perfiles, entre ellos el que mencionó nuestro Sr. Presidente, sobre la edad máxima, cuarenta años. Ganar un premio con todos los méritos del Dr. Pablo Euillades, a los 33 años, merecería otro premio. El jurado no tuvo mayores dificultades. El número de candidatos era importante, los sometimos a un escrutinio serio, los analizamos, los calificamos, y todos los miembros del jurado llegamos por unanimidad a definir el ganador, que fue el Ing. Euillades. El cúmulo de conocimientos que ha acumulado en su carrera, corta desde el punto de vista de los tiempos, pero muy larga y profunda desde el punto de vista del conocimiento, de la experiencia y la aplicación de esta experiencia. El cúmulo de esos antecedentes permitió definir con facilidad al merecedor del premio.

El Ing. Euillades es mendocino, nacido en Godoy Cruz. Se graduó como Ingeniero en Petróleo en la Universidad Nacional de Cuyo en el año 1998 e hizo su doctorado en 2004 en la misma Universidad. Ha hecho la carrera docente, ha hecho la carrera de Investigador, ha sido un consultor en temas para nada abstractos, pero relacionados con las mejores tecnologías aplicables hoy en el mundo para distintos fines. Su orientación ha sido claramente aplicada a la lectura de la información satelital con fines muy específicos, muy relacionados en general con lo que es la especialidad de su carrera, que es Ingeniería en Petróleo.

Ha llegado actualmente a ser profesor titular en la Cátedra de Perforación y Exploración en la Facultad de Ingeniería en la Universidad Nacional de Cuyo. Antes de eso tuvo una carrera docente que atravesó distintos estamentos en la

misma universidad. Ha dictado cursos relacionados con su especialidad, que no voy a mencionar porque tenemos catorce páginas de currículum que no están para nada expandidas, sino comprimidas. Voy a fijar algunos de sus hitos y de sus tareas. Por de pronto, uno de sus primeros cursos fue sobre tratamiento de imágenes satelitales. Tiene 19 publicaciones de relevancia, algunas como responsable principal, algunas él solo, y otras en conjunto con un grupo de colaboradores, relacionadas con los temas de la interpretación de imágenes satelitales y todas las derivaciones que tiene esa tarea y sus aplicaciones. Ha asistido a congresos, ha estado presente, ha sido un ingeniero que se ha preocupado de estar al día y de traer esos conocimientos al plano de su cátedra y de su profesión. Esto es algo que debemos destacar, porque si hay algo que caracteriza la inquietud de un profesional que quiere desarrollarse no sólo él mismo sino también la ciencia que él trata es estar al día con los mejores avances en el mundo.

El Ing. Euillades ha participado en temas y proyectos con la NASA, es decir que ha sido consultado por quienes hoy buscan estos tipos de análisis, que sólo muy pocos en cada país deben dominar.

Ha expuesto numerosamente en congresos, ha sido organizador de congresos que competen a su especialidad, ha participado intensamente en proyectos de investigación y desarrollo y este es un tema que hay que destacar. Ha sido investigador de la Universidad Nacional de Cuyo, gran parte de su tiempo ha estado aplicado al desarrollo de nuevas tecnologías, a la investigación, y lo que uno advierte de su historia es que ha compartido este trabajo con equipos que luego se han ligado a él en la producción de documentos y en conclusiones de las investigaciones. Ha tenido una particular inquietud en transferir la tecnología. Ha trabajado en un par de convenios importantes que ha suscripto su universidad con otras entidades. Por ejemplo, la Comisión Nacional de Actividades Espaciales de nuestro país, y a través de este convenio se han coordinado esfuerzos en el procesamiento de imágenes satelitales y aplicaciones en áreas tales como el petróleo, la minería, el agro, el impacto ambiental, los estudios tectónicos, la planificación urbana y las aplicaciones catastrales. Participó activamente en un convenio entre el Instituto CEDIAC, que funciona en la Universidad Nacional de Cuyo, y la Facultad de Filosofía y Letras de la misma Universidad y el Pacific GPS Facility, que es un instituto radicado Hawai, para tener una idea de cómo ha viajado su imaginación y su actividad por el mundo.

Por lo que he dicho, uno podría imaginar que el Ing. Euillades es un investigador que está encerrado en su universidad tratando de desarrollar tecnología sin conectarse con el mundo, pero lo hemos visto aplicar esa tecnología en cosas muy concretas, en trabajos que ha realizado como consultor o como parte del

equipo de su universidad para empresas, sobre todo petroleras, por ejemplo la "Construcción de un Modelo Digital de Elevación mediante interferometría SAR, Área Llancalelo, combinando pasadas ascendentes y descendentes de los satélites ERS y ENVISAT", que a todos nos suena como un área de yacimientos petrolíferos, apoyado en antecedentes de satélites que hoy están girando alrededor del mundo y son los que aportan la información, o son satélites de punto fijo.

Y así podríamos mencionar lo que el Ing. Bignoli señaló como su actividad en el Acuífero Guaraní, que es algo que siempre a los ingenieros despierta una imaginación, una inquietud, pero también en otras áreas petroleras como Rancuil Norte, Llancalelo, distintas empresas, Wintershall Energía S.A., Repsol YPF, ASTRA CAPSA, y hay un número muy grande de trabajos de objetivos muy concretos que seguramente han contribuido al mejor conocimiento de las reservas petrolíferas de distintos yacimientos y a su mejor aprovechamiento. No voy a enumerar todos, porque hay varias páginas, pero francamente son impresionantes.

Ha asistido a 25 cursos desde que comienza su carrera de ingeniería hasta el día de hoy, o sea que ha tenido una inquietud paralela a la formación básica de su carrera, a la realización de su doctorado, por perfeccionarse en temas como la geodesia, el procesamiento de imágenes, muchas de estas especializaciones son paralelas a las que el eligió como principal motivo de su preocupación profesional.

Esto nos llevó a observar en el Ing. Euillades el perfil que nosotros siempre buscamos, por lo menos desde que yo estoy en el jurado del premio Marín, que es una preocupación de investigación, actividad académica, actividad profesional, inquietud por el desarrollo de la ciencia, aplicación de la ciencia a la Ingeniería concreta en cuestiones que tienen que ver luego con el desarrollo del país. Todo esto se da en la figura del Ing. Euillades, de manera que estamos muy contentos y muy conformes de que el haya tenido este premio, que hoy nos acompañe acá y que nos exponga un trabajo que seguramente nos va a introducir a los que no hemos estado nunca en esta especialidad con las dificultades de concreción que surgen por ese motivo, nos va a introducir en aquello que ha sido la construcción de su profesión y de sus méritos hasta el día de hoy.

El Ing. Euillades está aquí acompañado por su familia, que ha venido desde Mendoza, lo cual tiene un doble mérito, con todo lo que hoy está sucediendo en las rutas. Los dejo a Uds. con el Ing. Euillades.

IMÁGENES SATELITALES DE RADAR: APLICACIONES EN GEODINÁMICA, ACTUALIDAD Y PERSPECTIVAS

Dr. Ing. PABLO ANDRÉS EUILLADES
Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, UNCuyo
Director de la División ISAT, ICEDIAC, FI, UNCuyo

Resumen

En este trabajo se presenta una perspectiva general de la utilización de imágenes satelitales de radar en estudios geodinámicos. En primer lugar, se introducen muy brevemente los principios de funcionamiento del radar de apertura sintética, que es el instrumento con el cual se adquieren las imágenes utilizadas. Posteriormente, se demuestra cómo a partir de la información de fase contenida en pares de imágenes es posible estimar la topografía del área iluminada o registrar la deformación ocurrida en el período de tiempo transcurrido entre adquisiciones. Las técnicas utilizadas reciben los nombres de Interferometría SAR e Interferometría diferencial, respectivamente. A continuación, se dedica una sección completa a las limitaciones de ambos métodos: decorrelación geométrica, decorrelación temporal e influencia de la atmósfera.

Como caso de estudio, se aplica la técnica descrita a un área de interés que incluye a la ciudad de Mendoza y alrededores. Este caso sirve como ejemplo de la dificultad para interpretar los resultados en presencia de un fuerte patrón de influencia atmosférica, y sirve como introducción a una de las técnicas avanzadas basadas en imágenes de radar: Small baseline subsets (SBAS), la cual se explica brevemente.

Finalmente, se muestran los resultados obtenidos mediante SBAS en el área de estudio citada. Mediante el análisis de la velocidad media de deformación en el período 1/2005 - 10/2007 ha sido posible identificar patrones de deformación, posiblemente relacionados con descarga/recarga de acuíferos subterráneos y actividad petrolera en la zona.

Como conclusión se subraya la importancia de las técnicas detalladas para el estudio y comprensión de procesos deformativos actualmente en curso y se evalúa su aplicabilidad en otras áreas dentro de la Argentina.

Palabras clave: Interferometría diferencial, subsidencia, deformación cortical, Mendoza, SBAS.

Abstract

This work addresses SAR images usefulness in geodynamics. Firstly, synthetic aperture radar basics are succinctly explained. Then, we demonstrate how to use phase information for topography

and displacement estimation, through InSAR and DInSAR techniques respectively. InSAR and DInSAR description includes a brief explanation of their inherent limitations: geometric decorrelation, time decorrelation and atmospheric patterns.

As a study case, DInSAR processing of an Area of Interest is addressed. The AOI is centered in Mendoza City and includes its surroundings: an agricultural belt around the city, high relief precordillera, Mendoza river basin and Barrancas oilfield. Difficulty in interpreting the results becomes clear from the examples, because of the strong atmospheric pattern affecting the signal. This fact serves as introduction to more advanced techniques, like SBAS (Small baseline subsets).

Finally, SBAS results over the AOI are presented. The processed time span is 01/2005 - 10/2007. It allowed to identify deformation spots possibly related to aquifer dynamics and petroleum extraction operations.

To conclude, the importance of InSAR and DInSAR techniques in geodynamic studies is highlighted, and their applicability in Argentina are summarized.

1. Radar de Apertura Sintética

El término radar es una sigla derivada del inglés *radio detection and ranging*, que significa detección y medición de distancias mediante señales de radio. Entonces, tal como su nombre lo indica, el radar es un instrumento que permite medir distancias (Curlander y McDonough, 1991). Para ello el sistema emite una señal electromagnética hacia el objeto distante, que interactúa con el mismo, produciendo la retrodispersión de parte de la energía. Dicha energía retrodispersada es luego detectada por el mismo sistema emisor (funcionando en modalidad recepción) y utilizando diversas técnicas basadas en el tiempo de tránsito o la fase, es posible estimar la distancia.

El radar de imágenes o radar de apertura sintética utiliza esencialmente el mismo principio, pero tiene algunas particularidades, ya que su objetivo final no es medir distancias, sino constituir una imagen de la porción de terreno observado. Este instrumento está montado a bordo de un avión o de un satélite, que con su desplazamiento a lo largo de una trayectoria determinada permite hacer el barrido de la porción iluminada. El radar va emitiendo pulsos de energía EM, con una longitud de onda fija, con una frecuencia determinada y constante, intercalando intervalos de escucha entre pulso y pulso, tal como está esquematizado en la Figura 1.

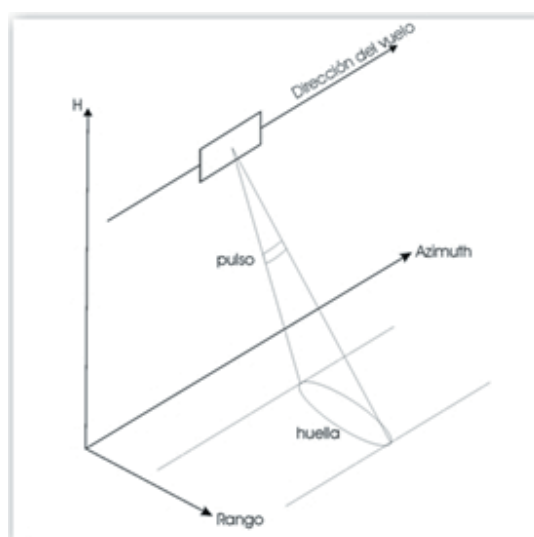


Figura 1. Esquema de adquisición de datos por un Radar de Apertura Sintética

Tales intervalos le permiten a la energía EM viajar hacia el terreno y, al ser dispersados por los elementos que hay en el suelo, parte de esa energía retorna al instrumento en escucha y son registrados o directamente transmitidos a alguna estación de enlace. Es necesario destacar que el Radar de Apertura Sintética es un dispositivo de visión lateral.

Finalmente, se obtiene un paquete de información ordenada en dos direcciones de tiempo, uno es el tiempo de vuelo del satélite (azimuth), el otro es el tiempo de viaje entre el radar y el suelo (rango). A partir de esta información, y mediante un complejo proceso conocido como enfoque, se puede sintetizar la imagen de radar. Es necesario mencionar que la imagen de radar caracteriza el vector de retrodispersión de manera completa, mediante información de amplitud y de fase, y esta última es utilizada para realizar estudios de geodinámica.

2. Interferometría radar (InSAR)

Interferometría Radar es una técnica que permite, aprovechando la información de fase contenida en la imagen de radar, estimar la topografía del área

estudiada (Zebker y Goldstein, 1986). Para ello es necesario obtener dos imágenes de la misma zona, tomadas desde puntos de vista ligeramente diferentes.

La adquisición de imágenes puede realizarse en una única pasada del sensor o en pasadas sucesivas Ferretti et al., (2007). La configuración en una pasada requiere que dos antenas sean montadas en la plataforma (satelital o aérea), con una separación espacial muy bien conocida. Ejemplo de este tipo de configuración es la Shuttle Radar Topography Mission Farr et al., (2007), que adquirió imágenes interferométricas durante 11 días en el año 2000.

La configuración en pasadas sucesivas es más adecuada para plataformas orbitales, ya que el montaje de dos antenas de grandes dimensiones en un satélite artificial plantea serias dificultades tecnológicas. El desarrollo subsiguiente está adaptado a este tipo de configuración, pudiéndose ver un corte esquemático de la geometría de adquisición en la figura 2. En la misma, S_1 y S_2 denotan la posición del satélite al momento de las adquisiciones, R_1 y R_2 son las distancias respectivas a un punto (P) dentro del área iluminada, y B es la distancia entre S_1 y S_2 . B puede ser descompuesta en dos direcciones ortogonales: paralela (B_{para}) y perpendicular (B_{perp}) a la línea de vista del satélite, siendo esta última un parámetro de capital importancia en lo subsiguiente.

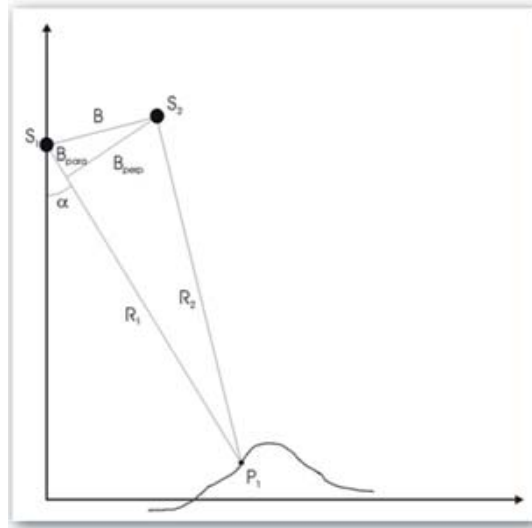


Figura 2. Vista en corte transversal al vuelo de la configuración de adquisición de imágenes de un sistema interferométrico. S_1 y S_2 son las posiciones del satélite al momento de tomar 2 imágenes

A partir del esquema de la figura 2 es posible escribir las siguientes ecuaciones para la fase del punto P en la imagen 1 y 2 respectivamente.

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2R_1 + \Phi_1 \quad (1)$$

$$\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2R_2 + \Phi_2 \quad (2)$$

Donde λ es la longitud de onda utilizada por el sistema y R es la distancia sensor-tierra. El término Φ tiene su origen en la interacción de la energía electromagnética con el suelo y se explica a continuación.

La unidad de resolución observada por el Radar de Apertura Sintética tiene un tamaño que depende de los parámetros del sistema, pero que típicamente está en el orden de unos 5 x 5 metros cuadrados. Esta región es iluminada con energía electromagnética que interactúa con cada uno de los elementos que existen dentro de ella, produciendo un conjunto de ecos dispersados. Sin embargo, cada unidad de resolución está representada en la imagen final por un único valor de amplitud y fase, que se compone a partir de dichos ecos como la suma coherente de los mismos. Este fenómeno de interferencia produce un cambio de fase a priori desconocido que da origen al término Φ . Dado que la distribución de elementos dispersores dentro de una celda de resolución puede considerarse aleatoria, la fase de una imagen de radar tiene una estructura igual a la del ruido blanco, es decir distribución uniforme entre $-\pi$ y π y no presenta ninguna utilidad práctica conocida.

Entonces, la fase de la imagen de radar es proporcional a la distancia recorrida por la energía EM más un término de fase desconocido. Haciendo la hipótesis de que la distribución de elementos dispersores dentro de la celda de resolución no ha cambiado en el tiempo transcurrido entre imágenes, la diferencia de fase entre las mismas puede expresarse como:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1) \approx \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{perp}}{R \cdot \sin(\alpha)} \cdot z \quad (3)$$

La deducción del término de la derecha excede los alcances de este trabajo y puede verse en referencia. Es preciso notar que la diferencia de fase entre las dos imágenes es proporcional a la altura topográfica del punto P (z), y que la

constante de proporcionalidad depende únicamente de parámetros del sistema conocidos. Nótese también que la sensibilidad de la diferencia de fase a cambios en altura depende de B_{perp} , no pudiendo ésta ser nula. La diferencia de fase es también conocida como fase interferométrica.

En resumen, si la distribución de elementos dispersores dentro de la celda de resolución no varía entre imágenes, el término Φ se anula al hacer la diferencia de fase y tenemos un medio de estimar la topografía a partir de la fase interferométrica. En la figura 3 se muestra un ejemplo de interferograma construido a partir de dos imágenes radar del Yacimiento Barrancas, en la Provincia de Mendoza. El patrón de fase del interferograma es muy similar a una representación de curvas de nivel.



Figura 3. Interferograma topográfico del yacimiento Barrancas (Mendoza). Las franjas de fase toman valores que varían entre $-\pi$ y π .

3. Interferometría diferencial (DInSAR)

Esta técnica se basa en el mismo principio que la anteriormente descrita, pero permite estimar desplazamientos de unos pocos centímetros al año ocurridos dentro del área estudiada Massonnet y Feigl, (1998). Para ello es preciso adquirir dos imágenes en instantes diferentes, entre los cuales se ha producido una cierta deformación de la corteza terrestre. A diferencia de la aplicación orientada a topografía, en este caso es importante que las dos imágenes sean adquiridas desde la misma posición en el espacio, tal como puede verse en la figura 4.

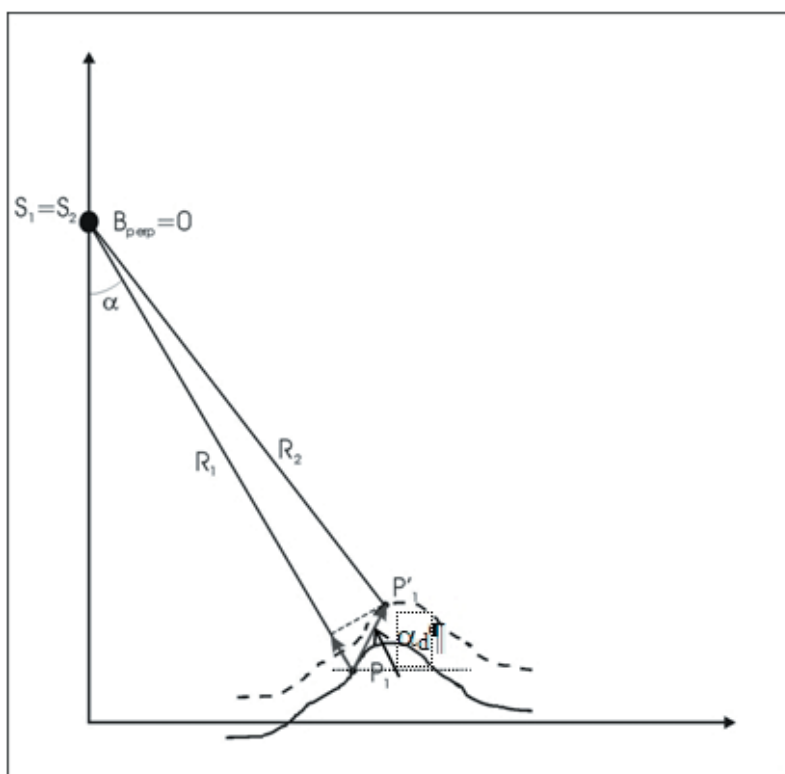


Figura 4. Vista en corte transversal al vuelo de la configuración de adquisición de imágenes de un sistema interferométrico diferencial. El punto P_1 en el suelo se ha desplazado a la posición P_1' al momento de tomar la segunda imagen. El sistema mide la proyección del desplazamiento en línea de vista del satélite

En la figura, el terreno se ha desplazado en el intervalo de tiempo entre imágenes 1 (P_1) y 2 (P_1'). El desplazamiento es del tipo de los producidos por eventos sísmicos, deformación por movimiento de fluidos del subsuelo, etc. En este caso, la fase interferométrica puede expresarse:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1) = \frac{4\pi}{\lambda} d_{los} \quad (4)$$

$$d_{los} = d \sin(\alpha - \alpha_d) \quad (5)$$

Donde d_{los} es la proyección del desplazamiento sufrido por el punto P_1 en la dirección de línea de vista del sensor. Es decir, en este caso a partir de la fase es posible estimar una componente de la deformación producida.

Sin embargo, es prácticamente imposible obtener las dos imágenes desde exactamente el mismo punto en el espacio, ya que habría que repetir la órbita satelital con gran exactitud. Entonces, si se ha producido deformación y se adquieren imágenes desde puntos de vista diferentes, la fase interferométrica contendrá la componente producida por la deformación y la componente producida por la topografía, tal como indica la ecuación 6.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{parr}}{R \cdot \sin(\alpha)} \cdot z + \frac{4\pi}{\lambda} d_{los} \quad (6)$$

Para estimar deformación en este caso es necesario compensar la componente de fase interferométrica introducida por la topografía. Esto se realiza calculando el primer término a la derecha de la ecuación 6 mediante un modelo digital de elevaciones externo, y restádoselo a la fase interferométrica Massonnet et al., (1993). La componente restante puede ser así interpretada en términos de desplazamiento. La figura 5 muestra un caso de aplicación de esta técnica en la caldera del Cerro Blanco, un área de estudio ubicada al Oeste de la Provincia de Catamarca.

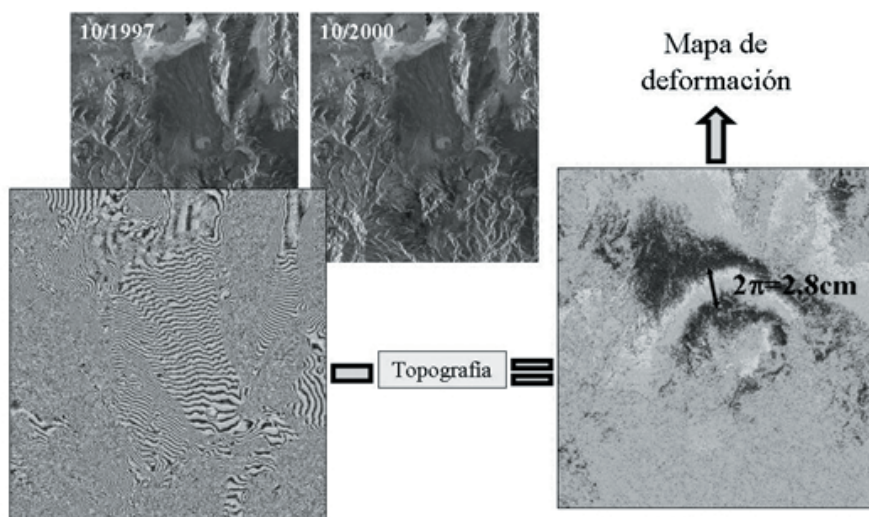


Figura 5. Ejemplo de productos obtenidos mediante procesamiento interferométrico diferencial. Se observan dos imágenes SAR de la caldera del Cerro Blanco (Oeste de Catamarca), y el interferograma obtenido a partir de las mismas. Este interferograma contiene información topográfica, pero al restarle la topografía mediante un MDE externo, se obtiene un interferograma diferencial que permite apreciar el patrón de deformación centrado en la caldera.

4. Limitaciones

Las limitaciones de las técnicas descritas se producen por el no cumplimiento de alguna de las hipótesis subyacentes. Primero analizaremos qué ocurre cuando la distribución de elementos retrodispersores se modifica entre imágenes. En este caso, los términos Φ de las ecuaciones 1 y 2 son distintos y por lo tanto no se cancelan completamente al calcular la diferencia de fase. Este fenómeno es conocido como decorrelación, y produce una reducción en la relación señal/ruido de la fase interferométrica. Si las imágenes no son tomadas desde exactamente el mismo sitio en el espacio, la geometría de observación varía y aparece una componente de decorrelación denominada decorrelación geométrica. Si el terreno se modifica entre adquisiciones, aparece una segunda componente de decorrelación, denominada decorrelación temporal.

Además de las anteriormente mencionadas, hay otras fuentes de ruido que introducen decorrelación, tales como el ruido del sistema y defectos del procesamiento digital tales como enfoque deficiente de las imágenes y mala corrección entre las mismas.

4.1. Decorrelación geométrica

Un punto en el terreno es observado por el radar con una geometría interferométrica determinada. En la medida en que mayor sea la línea de base entre imágenes, más distinto será el ángulo de incidencia correspondiente a cada una de ellas, tal como muestra la figura 6. Como consecuencia de esto, a medida que la línea de base aumenta, la decorrelación también aumenta, y esto ocurre hasta un punto denominado línea de base crítica, para la cual la correlación entre imágenes es nula. Zebker et al., (1994) deducen el valor de esta línea de base crítica como:

$$B_c = \frac{\lambda \cdot R}{2 \cdot R_y \cdot \cos^2 \theta} \quad (7)$$

donde R_y es la resolución sobre el suelo en la dirección de rango (perpendicular al vuelo del satélite) y θ es el ángulo de incidencia local. Valores típicos de B_c para distintos satélites se listan en la Tabla 1.

Tabla 1
Línea de base crítica para distintos sistemas de radar

Sistema	B_c
ERS 1-2	1050 m
JERS	6750 m
Radarsat 1(*)	1200 m – 2600 m
ENVISAT(†)	850 m – 3000 m
Saocom (proyectado)	10500 m – 27200 m

(*) El rango corresponde a los modos standard entre el 1 y el 7, con ángulos de vista y ancho de banda variables.

(†) El rango corresponde a los modos Image 1 al 7, con ángulos de vista variables.

Amplios estudios de este fenómeno pueden encontrarse en Li y Goldstein, (1990), Zebker y Villasenor, (1992) y Gatelli et al., (1994).

4.2. Decorrelación temporal

Un determinada porción de terreno, vista a la escala de la Energía Electro-magnética incidente, presenta una distribución aleatoria ya que dentro de cada celda de resolución se hallan presentes múltiples centros de retrodispersión (Ulaby et al., 1986). O sea que cambios en la distribución de los reflectores ocurridos en el período de tiempo entre adquisiciones van a modificar la respuesta y, por lo tanto, introducirán decorrelación entre imágenes. Ésta es la raíz del fenómeno de decorrelación temporal.

El tiempo que podrá transcurrir antes de que la decorrelación sea completa depende de la velocidad con que ocurran cambios del orden de λ . Esto es función directa del tipo de terreno y de los fenómenos climáticos involucrados. Como regla general, puede decirse que mientras más grande es λ , más tiempo se mantiene la correlación (Rosen et al., 1996).

Factores tales como contenido de humedad del suelo, crecimiento de la vegetación, modificación de la superficie por lluvias, nieve o viento provocan decorrelación entre imágenes. Los factores citados tienen estrecha relación con el tipo de terreno que se está tomando. Naturalmente, terrenos áridos, en los cuales no llueve frecuentemente y la cobertura vegetal no es significativa, serán capaces de preservar correlación durante períodos más prolongados que zonas boscosas o selváticas. Por esta misma razón, regiones cubiertas de agua (océanos, ríos, áreas inundadas) serán incapaces de preservar correlación, aun durante períodos mínimos de tiempo.

Es importante notar que para que se dé el fenómeno de decorrelación es necesario que el movimiento de los reflectores sea aleatorio y del orden de la longitud de onda incidente. Numerosas simulaciones y estudios de este fenómeno pueden encontrarse en la literatura (Zebker y Villasenor, 1992; Li y Goldstein, 1990). Movimientos en bloque del terreno producen un cambio de fase mensurable y que puede ser utilizado para detectar y caracterizar campos de desplazamiento.

4.3 Grado de Coherencia

Para caracterizar el fenómeno de decorrelación entre imágenes se utiliza el grado de coherencia (usualmente denominado coherencia o correlación interferométrica), definido pixel a pixel entre dos imágenes complejas S_1 y S_2 como (Franceschetti y Lanari, 1999):

$$\gamma = \frac{|E[S_1 \cdot S_2^*]|}{\sqrt{|E[S_1 \cdot S_1^*]| \cdot |E[S_2 \cdot S_2^*]|}} \quad (8)$$

donde * significa complejo conjugado y S_1 y S_2 son consideradas variables aleatorias complejas. $E[\]$ representan los promedios en el tiempo de la ocurrencia de un valor en las imágenes.

Si bien la coherencia en un par de imágenes no puede ser estimada en base a un único pixel, en la práctica los promedios en el tiempo (ensemble en la literatura) son reemplazados por promedios espaciales, tomados en una ventana pequeña de tamaño $M \times N$.

La coherencia entre dos imágenes toma valores entre 0 y 1. Cuando γ es igual a 0, las imágenes están totalmente decorrelacionadas, mientras que cuando es igual a 1 están completamente correlacionadas.

4.4. Influencia de la atmósfera

En la deducción de las ecuaciones 3 y 4, que relacionan fase con topografía y desplazamiento respectivamente, se ha supuesto que la velocidad de propagación de la EM emitida por el radar es constante. Esta suposición no es completamente válida en la atmósfera terrestre, la cual es inhomogénea y tiene un índice de refracción ligeramente más elevado que el del vacío. Esto implica que las cotas topográficas y deformación estimadas sobre la base de consideraciones geométricas estarán afectadas por errores si los tiempos de tránsito y las fases observadas se ven alteradas por la atmósfera.

Como el interferograma está formado por las diferencias de fase entre dos imágenes, no son los retardos atmosféricos absolutos los que introducen error, sino la variación de los retardos en una y otra toma. Según Hanssen (1998), dos capas de la atmósfera introducen errores de distinta naturaleza: la ionósfera y la tropósfera.

Un incremento del número de electrones libres en la ionósfera produce una aceleración de la señal electromagnética. El contenido de electrones libres en esta capa de la atmósfera puede ser estimado con base de mediciones de GPS y se ha demostrado que presenta una variabilidad caracterizada por longitudes de onda espaciales de decenas, centenas y miles de kilómetros.

La velocidad de propagación en la tropósfera depende de la temperatura, presión atmosférica y humedad relativa. El retardo puede descomponerse en retardo hidrostático (el debido a la presión atmosférica) y retardo húmedo (el debido a la humedad relativa), siendo este último el más difícil de estimar debido a la elevada variabilidad de la humedad relativa (Bevis et al., 1992).

Como resultado de los retardos descritos, aparecen anomalías en el interferograma, y no es posible determinar si son rasgos topográficos o errores sin información adicional (Zebker et al., 1997). Por ello se han propuesto varios modelos que permiten tener en cuenta este fenómeno, desde ecuaciones semiempíricas que dan el retardo en función de valores de presión, temperatura y humedad relativa medidos en superficie, hasta modelos atmosféricos complejos basados en mediciones de estaciones continuas de GPS (Williams et al., 1998).

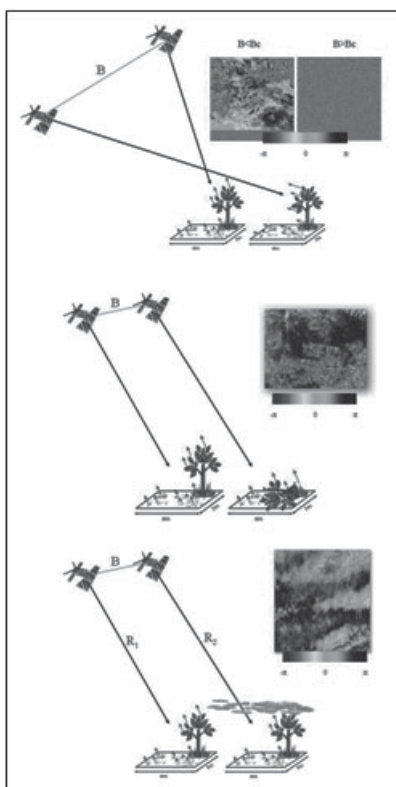


Figura 6. Se ilustran las causas y efectos de decorrelación geométrica (viñeta superior), decorrelación temporal (viñeta central) e influencia atmosférica (viñeta inferior). En la viñeta superior se muestran interferogramas con línea de base menor y mayor que la crítica. En la viñeta central, el interferograma muestra una zona de campos cultivados, donde la decorrelación temporal se da en algunos de ellos. En la viñeta inferior, el interferograma diferencial muestra un claro ejemplo de patrón atmosférico

Como ejemplo de los problemas descriptos, Zebker et al. (1997) utilizan la relación empírica de la ecuación 8 para calcular el camino adicional recorrido por la onda electromagnética en una atmósfera real. En la misma Λ es la latitud y P_s , T_s , y e_s son la presión (milibares), la temperatura (Kelvin) y la presión parcial de vapor de agua (milibares) en superficie respectivamente. Este valor de Δx puede ser traducido fácilmente en valores de fase.

$$\Delta x = \left[2.277 \times 10^{-3} - 1.11 \times 10^{-5} \cdot \cos(\Lambda) \right] \cdot P_s + 2.277 \times 10^{-3} \cdot \left[0.05 + \frac{1255}{T_s} \right] \cdot e_s \cdot (9)$$

5. Aplicación a un caso testigo

El área de interés está centrada en la ciudad de Mendoza y abarca una gran diversidad de usos del suelo (Figura 7). La zona urbanizada incluida está representada por el Gran Mendoza, que constituye una urbe de aproximadamente un millón de habitantes, y las villas cabeceras de los departamentos del Este mendocino. Mendoza está circundada por un cinturón agrícola, en donde las tierras irrigadas por los ríos Mendoza y Tunuyán se hallan dedicadas principalmente al cultivo de la vid y chacra. Más allá de la zona agrícola, el área está cubierta por vegetación baja y rala, típica del clima semidesértico de la región. En este grupo es posible incluir a los yacimientos de petróleo Barrancas y Tupungato, ubicados en el extremo sur central y Oeste del área. Finalmente, en el extremo Nor-Oeste está incluida la Precordillera y el tramo medio del Río Mendoza, embalsado en la localidad de Potrerillos.



Figura 7. Localización del área de interés procesada

Para el estudio se utilizó un conjunto de 29 imágenes adquiridas en pasada ascendente por el satélite ENVISAT, de la Agencia Espacial Europea. El intervalo de tiempo estudiado abarca desde Enero de 2005 a Octubre de 2007. La técnica aplicada es interferometría diferencial, anteriormente descrita. Se construyó una serie de interferogramas tomando las imágenes de a pares, y respetando restricciones en las líneas de base espacial y temporal de manera tal de minimizar la decorrelación.

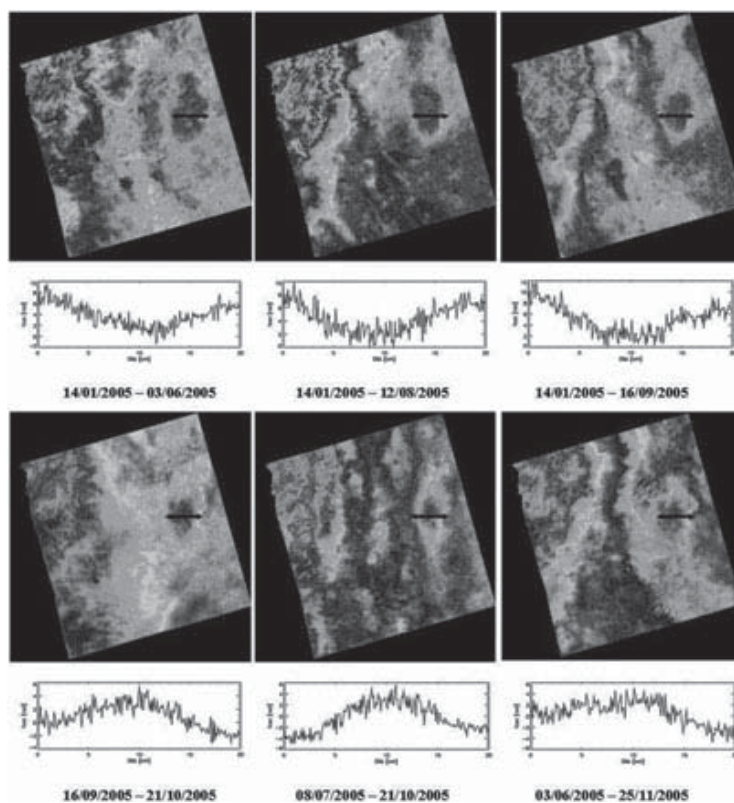


Figura 8. Viñeta superior: tres interferogramas diferenciales verano-invierno. Viñeta inferior: tres interferogramas diferenciales invierno-verano. Es posible observar la gran variabilidad introducida por la influencia atmosférica, pero también es notable un patrón de fase persistente en la zona media a al derecha del área de interés. Los cortes realizados sobre el mismo demuestran un cambio de signo posiblemente relacionado con un comportamiento estacional de la deformación

La figura 8 muestra una serie de seis interferogramas, extraídos del conjunto total calculado porque evidencia varios procesos de interés. En primer lugar, es preciso notar una gran variabilidad espacial en la fase de todos ellos, que indica la presencia de procesos atmosféricos distintos en cada una de las tomas. Este fenómeno, cuyo origen fue explicado con anterioridad, hace muy riesgoso interpretar las variaciones de fase observadas en términos de deformación. Sin embargo, el patrón de fase ubicado al Nor-Este de la ciudad de Mendoza permanece en todos los interferogramas, lo cual indica que es un proceso persistente a lo largo del tiempo. Además, si tomamos los interferogramas realizados con imágenes de verano-invierno, la fase varía en sentido positivo, mientras que tomando interferogramas invierno-verano la fase varía en sentido negativo. Esto está indicando que la deformación subyacente tendría características estacionales.

No obstante el análisis preliminar realizado, es muy riesgoso interpretar la variabilidad de fase observada en términos de deformación cuando la atmósfera introduce una fuerte influencia. Esto da lugar a la aparición de técnicas avanzadas que permiten filtrar la componente atmosférica y seguir la evolución de deformación a largo del tiempo.

6. Técnicas avanzadas: SBAS

SBAS es la sigla construida a partir de Small BAseline Subsets, y fue propuesta originalmente por Berardino et al. (2002), en cuyo trabajo puede verse un análisis pormenorizado de la técnica. Posteriormente, Casu et al. (2006) realizaron un análisis de exactitud de los resultados obtenidos en dos áreas testigo, comparando información obtenida mediante esta técnica y mediciones de GPS y nivelación tradicional.

Brevemente, dado un conjunto de N imágenes, SBAS propone construir un conjunto de interferogramas tomándolas de a pares. Sería posible construir un máximo de $N(N-1)/2$ interferogramas, pero con el objetivo de mantener elevada la coherencia interferométrica se imponen dos restricciones: 1) el intervalo de tiempo entre imágenes no puede superar un umbral determinado en base a la tipología del área estudiada y 2) la línea de base máxima entre imágenes es acotada en función del sistema satelital utilizado. De esta manera, se construyen M interferogramas, donde M puede tener un valor mínimo de $N/2$ y un máximo de $N(N-1)/2$.

La fase interferométrica en cada píxel de cada interferograma está relacionada con el desplazamiento ocurrido (proyectado en línea de vista) según lo expresado en la ecuación 4, la cual puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}(d_1 - d_2) \quad (10)$$

en donde d_1 y d_2 representan ahora los desplazamientos ocurridos en el instante de la imagen 1 y 2 respectivamente, pero referidos a un instante de origen común (0), arbitrariamente elegido.

Como se han construido M interferogramas, existen para cada píxel M ecuaciones de la forma de 10, que pueden ser resueltas para obtener los valores de d_1 a d_N . En general este sistema tiene solución y como resultado se obtiene una serie temporal de deformación. Sin embargo, no todos los píxeles de una escena producirán resultados valiosos, ya que para que esto ocurra el píxel debe mantener una coherencia interferométrica elevada en un número significativo de interferogramas.

Si bien el principio en el que se basa la técnica es sencillo, en la práctica es necesario realizar varios pasos de filtrado y resolución del sistema de ecuaciones 10. Finalmente, se incluye una etapa de filtrado de la componente atmosférica. Esta componente es característicamente de gran variabilidad temporal y, en general, de gran extensión espacial, por lo que se utiliza un filtro pasa bajo en el tiempo y pasa alto en el espacio.

7. Resultados

El conjunto de 29 imágenes previamente utilizado se procesó mediante la técnica SBAS. Como umbral se utilizaron los siguientes valores: la línea de base temporal entre imágenes no debe superar los 1.500 días y la línea de base espacial (proyección perpendicular a la línea de vista) no debe superar los 600 m. Con estas restricciones se construyeron 93 interferogramas, en los cuales se compensó la componente de fase topográfica mediante el modelo digital de elevaciones SRTM (Jarvis et al., 2006). Finalmente, cada interferograma se filtró promediando en una ventana de 20 x 4 píxeles con el objetivo de obtener una mayor reducción en el ruido inherente.

En primer lugar, corresponde analizar la velocidad media de deformación, mostrada en la figura 9. La misma nos da una idea de cuáles son las zonas de deformación activa dentro del área de interés. Puede observarse que hay buena

información en la zona urbanizada de la ciudad de Mendoza y áreas en donde se mantiene la vegetación autóctona, tales como el pedemonte y el anticlinal Barrancas. La velocidad de deformación en las áreas cultivadas que circundan a la ciudad ha sido enmascarada ya que es altamente ruidosa y por lo tanto no interpretable como deformación. En dichas áreas la coherencia interferométrica no se mantiene en el tiempo debido a la dinámica propia del cultivo de la tierra y la técnica SBAS no da resultados útiles. En la precordillera, ubicada en la parte noroeste de la escena, la coherencia tampoco se mantiene elevada debido a un efecto combinado de cambios en invierno (precipitación nívea) y altas pendientes.

Con base en la velocidad media de deformación es posible identificar tres grandes zonas donde la misma se aparta del cero en sentido positivo o negativo. La primera de ellas está relacionada con el anticlinal Barrancas, la segunda comprende una serie de zonas de elevación de la superficie asociada con el cauce del Río Mendoza, y la tercera está ubicada unos 60 km al este de Mendoza, en pleno cinturón agrícola. Analizaremos cada una de ellas en los siguientes párrafos con cierto detalle.

El anticlinal Barrancas, en conjunto con la estructura Cruz de Piedra al norte, son el área petrolera más cercana a la ciudad de Mendoza. Dentro del mismo se observan dos fenómenos deformativos de interés: 1) subsidencia en el orden de 0,5 cm/año, con un patrón espacial coincidente con el yacimiento Cruz de Piedra, y 2) un fenómeno muy localizado de *uplift*, ubicado en el flanco este de la estructura Barrancas. Los mecanismos causantes de este tipo de deformación no son del todo conocidos, aunque es muy posible que estén relacionados con la extracción de fluidos del subsuelo en la zona. La subsidencia en Cruz de Piedra constituiría un caso típico de compactación del subsuelo por reducción de presión en las capas productoras de petróleo. El fenómeno de *uplift* podría estar relacionado con la inyección de agua como método de recuperación asistida de petróleo.

En segundo lugar se observan una serie de eventos de *uplift* situados en coincidencia con el cauce del Río Mendoza. Aunque esto está aún en etapa de investigación, es bastante claro que dichos eventos están relacionados con fluctuaciones en los niveles estáticos de agua en el subsuelo. Estas fluctuaciones son de carácter estacional y su origen es natural y antropogénico: natural porque el Río Mendoza aumenta su caudal en la estación veraniega con el aporte de la nieve fundida en alta montaña; es también antropogénica porque gran parte de la tierra cultivada en el cinturón agrícola de Mendoza se riega con agua subterránea. Estos factores contribuyen al balance hídrico de los acuíferos, cuya zona principal de recarga se ubica a lo largo del cauce bajo del Río Mendoza.

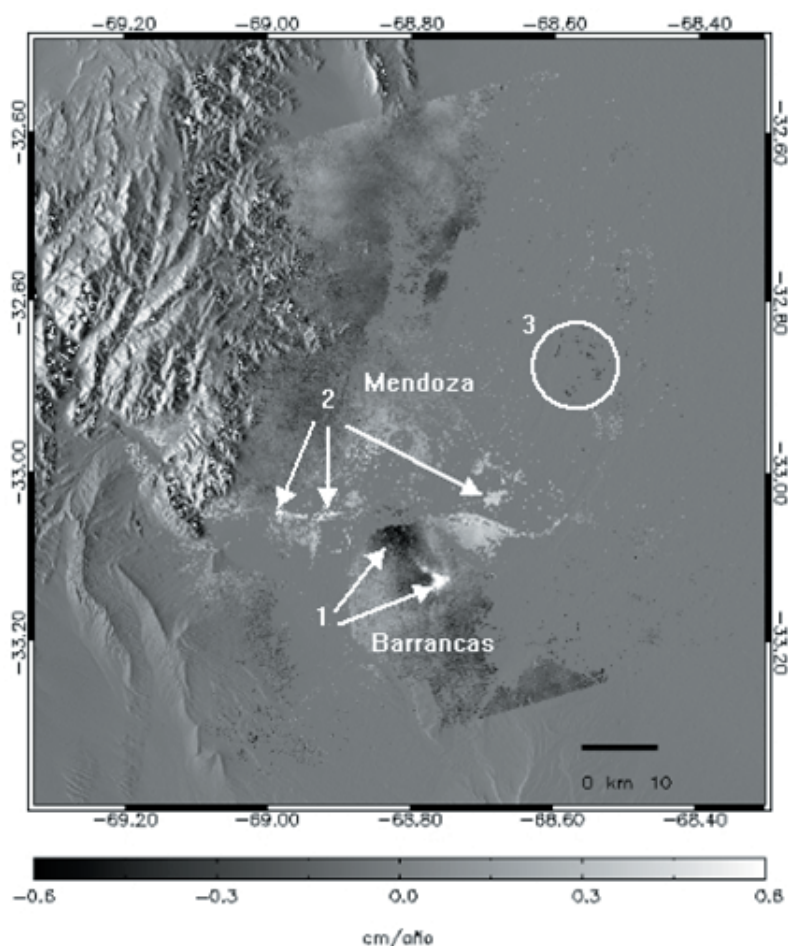


Figura 9. Velocidad media de deformación en el período 01/2005 – 10/2007.
1: Subsistencia y uplift en la estructura Barrancas. 2: Uplift sobre el cauce del río Mendoza. 3: Leve subsistencia en la zona agrícola irrigada con agua subterránea

En tercer lugar, es posible observar en la velocidad de deformación una muy leve subsistencia en la denominada Zona Este. Además, observando la forma que toma la serie temporal de deformación en la misma (figura 10), es posible notar el carácter estacional con subsistencia en verano y recuperación

en invierno. Esto es muy probablemente consecuencia de la utilización de agua subterránea para riego en la zona. El mecanismo propuesto es el siguiente: la estación veraniega es la de más consumo y se produce una sobreexplotación del acuífero con la consiguiente compactación del mismo; en el invierno se produce la recarga y hay una recuperación de presiones que de todos modos no alcanza para que las capas compactadas recuperen su forma original.

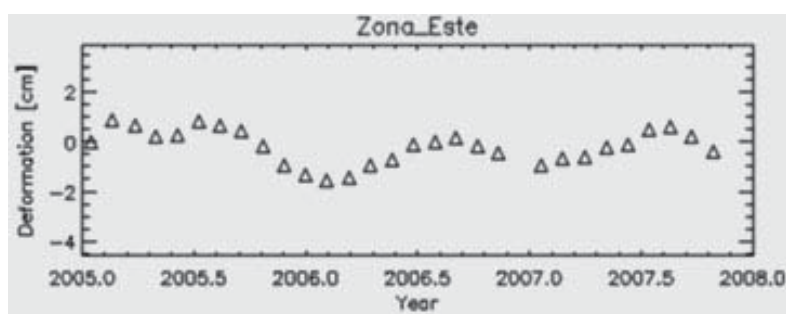


Figura 10. Serie de deformación extraída en el punto 3 de la figura 9

8. Conclusiones

Las técnicas expuestas en el presente trabajo constituyen un herramienta de gran utilidad para el estudio y comprensión de la geodinámica actual. A través de la caracterización de fenómenos deformativos de carácter regional o local es posible inferir mecanismos causales naturales tales como tectónica, sismicidad y vulcanismo; o antropogénicos tales como los relacionados con explotación de recursos minerales y excavaciones. Las aplicaciones prácticas de estos resultados abarcan diversas áreas desde el monitoreo de recursos naturales hasta la caracterización de peligro geológico por sismicidad y deslizamiento de laderas.

La aplicación de estas técnicas en la Argentina es totalmente factible, tal como ha sido demostrado en el caso tratado en este trabajo. La Comisión Nacional de Actividades Espaciales cuenta con un nutrido catálogo de imágenes adquiridas por los satélites ERS-1 y ERS-2, que abarcan el período 1997-2008. Además, existen series de imágenes adquiridas por el satélite ENVISAT cubriendo algunos sectores del territorio nacional, con fechas a partir de 2002, y que pueden ser adquiridas a la Agencia Espacial Europea.

En cuanto a la disponibilidad futura de imágenes satelitales para interferometría, durante 2007 se pusieron en órbita los satélites italianos COSMO-

Skymed 1 y 2, integrantes de la constelación SIASGE (Sistema Ítalo Argentino Satelital para Gestión de Emergencias). Esta constelación, actualmente en construcción, es un esfuerzo conjunto entre la Agencia Espacial Italiana y la CONAE. La misma prevé la puesta en órbita de dos satélites del tipo COSMO-Skymed adicionales y de dos satélites argentinos SAOCOM.

En resumen, la existencia de imágenes sobre territorio argentino permite realizar estudios de tipo histórico a partir de 1997. Además, se avizora una mucha mayor disponibilidad de este tipo de datos en el futuro cercano.

9. Referencias

- Berardino, P.; G. Fornaro; R. Lanari and E. Sansosti (2002), "A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383.
- Bevis, M.; S. Businger; T. Herring; C. Rocken; R. Anthes and R. Ware (1992), "GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System", *Journal of Geophysical Research*, 97(D14), 15787-15801.
- Casu, F.; M. Manzo and R. Lanari (2006), "A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data", *Remote Sensing of Environment*, 102 (doi:10.1016/j.rse.2006.01.23), 195-210.
- Curlander, J. C. and R. N. McDonough (1991), *Synthetic Aperture Radar. Systems and Signal Processing*, John Wiley & Sons, New York, 647 pp.
- Farr, T.; P. Rosen; E. Caro; R. Crippen; R. Duren; S. Hensley; M. Kobrick; M. Paller; E. Rodriguez; L. Roth; D. Seal; S. Shaffer; J. Shimada; J. Umland; M. Werner; M. Oskin; D. Burbank and D. Alsdorf (2007), "The Shuttle Radar Topography Mission", *Reviews of Geophysics*, 45 (doi:10.1029/2005RG000183).
- Ferretti, A.; A. Monti-Guarnieri; C. Prati; F. Rocca and D. Massonnet (2007), *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, ESA Publications, Noordwijk, The Netherlands.
- Franceschetti, G. and R. Lanari (1999), *Fundamentals of Synthetic Aperture Radar Processing*, edited, CRC Press LLC, Boca Raton (Florida).
- Gatelli, F.; A. Monti-Guarnieri; F. Parizzi, P. Pasquali; C. Prati and F. Rocca (1994), "The Wavenumber Shift in SAR Interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4), 855-865.
- Hanssen, R. (1998), *Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry*, Delft University Press, Delft, The Netherlands.
- Jarvis, A.; H. I. Reuter; A. Nelson and E. Guevara (2006), "Hole-filled SRTM for the globe Version 3", CGIAR-CSI SRTM 90m Database: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Li, F. and R. M. Goldstein (1990), "Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(1), 88-97.

- Massonnet, D.; M. Rossi; C. Carmona; F. Adragna; G. Peltzer; K. Feigl and T. Rabaute (1993), "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry", *Nature*, 364, 138-142.
- Massonnet, D. and K. Feigl (1998), "Radar Interferometry and its Application to Changes in the Earth's Surface", *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441-500.
- Rosen, P.; S. Hensley; H. Zebker; F. H. Webb and E. J. Fielding (1996), "Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry", *Journal of Geophysical Research*.
- Ulaby, F. T.; R. K. Moore and A. K. Fung (1986), *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Artech House, Norwood, MA.
- Williams, S.; Y. Bock and P. Fang (1998), "Integrated satellite interferometry: tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products", *Journal of Geophysical Research*, 103(B11), 27051-27868.
- Zebker, H. and R. Goldstein (1986), "Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations", *Journal of Geophysical Research*, 91(B5), 4993-4999.
- Zebker, H. and J. Villasenor (1992), "Decorrelation in interferometric radar echoes", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5), 950-959.
- Zebker, H.; C. Werner; P. Rosen and S. Hensley (1994), "Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4), 823-836.
- Zebker, H.; P. Rosen and S. Hensley (1997), "Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps", *Journal of Geophysical Research*, 102(B4), 7547-7563.