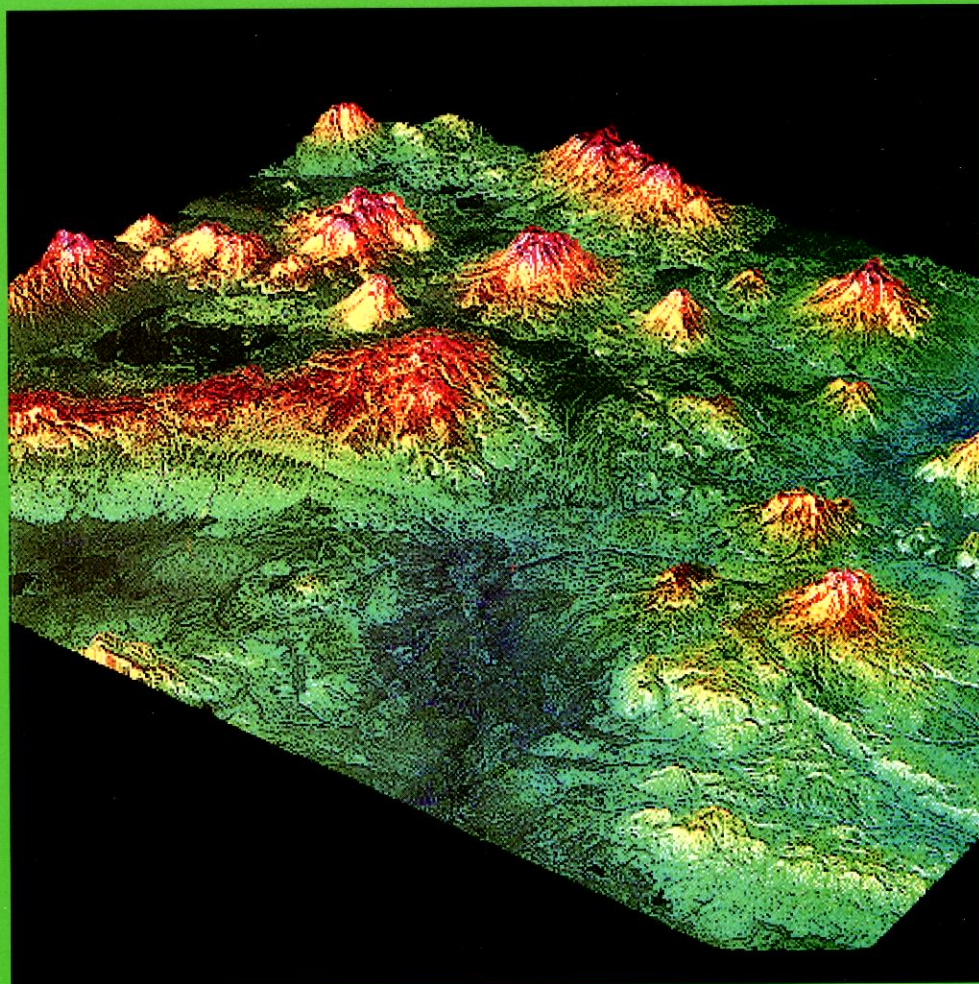


Revista  
**CARTOGRAFICA**



Número 71  
Julio-Diciembre 2000

Instituto Panamericano  
de Geografía e Historia



# Producción de MDA a partir de RADARSAT: Panorama y ejemplos

Th. Toutin\*  
K. Mattar\*\*  
B. Brisco\*\*\*  
L. Gray\*  
M. Manore\*

## Abstract

The recent launching of civil radar systems such as ERS and RADARSAT has led to the rapid development of techniques for extracting altimetric data on the basis of data from synthetic aperture radar. RADARSAT data offer a major potential in this sense due to the capacity of the sensors to make observations in stereocopies and to capture images from multiple angles of vision (from the same side and from the opposite one). To this we would have to add the ability to use interferometric methods in appropriate environments such as the Arctic, mountainous regions, and arid ones. In this note the authors present general guidelines and certain examples of stereoscopic and interferometric methods for constructing elevation and offset maps on the basis of RADARSAT data.

## Resumen

El lanzamiento reciente de sistemas civiles de radar, tales como ERS y RADARSAT, ha llevado al rápido desarrollo de técnicas para extraer información altimétrica a partir de los datos de radar de apertura sintética. En este sentido, los datos RADARSAT ofrecen un gran potencial por la capacidad de los sensores de observar en estereoscopia y tomar imágenes con múltiples ángulos de visión (del mismo lado y del opuesto). A esto se suma la capacidad de utilizar métodos interferométricos en entornos convenientes tales como el Ártico, zonas montañosas y regiones áridas. En esta nota se presentan las líneas generales y algunos ejemplos de métodos estereoscópicos e interferométricos para la construcción de mapas de elevación y desplazamiento a partir de los datos de RADARSAT.

\* Canada Centre for Remote Sensing, 588 Booth Street, Ottawa, Canada K1A 0Y7, Correo electrónico: thierry.toutin@ccrs.nrcan.gc.ca

\*\* Intermap Technologies, 2-200 Gurdwara Road, Nepean, Canada K2E 1A2.

\*\*\* Noetix Research Inc., 265 Carling Avenue, Ottawa, Canada K1S 2E1.

## Introducción

La teledetección ha evolucionado para convertirse en un importante complemento de las observaciones de la superficie terrestre y de la aerofotogrametría para el estudio de características topográficas, tales como la elevación del terreno. Con el advenimiento de los instrumentos que producen imágenes a partir de la radiación electromagnética en la porción del espectro invisible para el ojo humano e incluso para las cámaras fotográficas, se han ampliado en gran medida, la "visión y percepción" humanas.

¿Por qué es tan importante la percepción de la tercera dimensión? El hombre puede naturalmente observar en tres dimensiones. La percepción "natural", una representación tridimensional (3-D) de la realidad, mejora nuestra capacidad de interpretar las imágenes bidimensionales. Los cartógrafos, los ingenieros, los geólogos, los hidrólogos y otros geocientíficos, utilizan distintos métodos de visión tridimensional para percibir la elevación del terreno, a fin de comprender mejor la superficie de la Tierra (Toutin and Vester, 1999). Por ejemplo, la representación de la tercera dimensión proporciona una información importante acerca de la relación entre la forma de la Tierra y su estructura, pendientes y cuencas hídricas, materiales de la superficie y crecimiento de la vegetación.

Un modelo digital de elevación (MDE), que constituye una representación digital del relieve de la Tierra, es en la actualidad, una de las más importantes estructuras de datos para el análisis geoespacial. Desafortunadamente, todavía no se dispone para una gran parte de la Tierra, de MDE con detalles útiles y allí donde existen, no siempre tienen suficiente precisión. Puesto que el formato digital del MDE hace que el intérprete pueda obtener fácilmente información derivada para diversas aplicaciones, la creación de modelos de elevación se convirtió en una parte importante de los programas internacionales de investigación y desarrollo (I&D) relacionados con datos geoespaciales.

Debido a la elevada resolución espacial de las recientes naves espaciales de radar (SIR, Almaz, ERS, JERS, RADARSAT, etc.), un gran número de investigadores de todo el mundo, está trabajando en el desarrollo de modelización de elevación y en la producción de MDE. En éstos se han aprovechado las ventajas de los sistemas del radar de apertura sintética (SAR) y del procesamiento digital de las imágenes: funciones todo tiempo, de noche y de día, y procesamiento automatizado o semiautomatizado. La estereoscopia que reproduce la percepción humana de la profundidad, ha sido desde hace tiempo, un método popular para observar e interpretar las imágenes obtenidas por teledetección. Básicamente se utilizan pares de imágenes que se obtienen a partir de dos puntos de vista distintos sobre una misma extensión de terreno, a fin de calcular la elevación a partir de la paralaje obtenida entre puntos homólogos de ambas imágenes (Figura 1).

La interferometría radar es un método alternativo al estereoscópico tradicional, para extraer información sobre la altura relativa o absoluta. También puede utilizarse para medir el desplazamiento. Por contraposición con la estereoscopia, la interferometría extrae la información tanto de la imagen como de la fase de los datos de la señal SAR adquirida por dos antenas, desde puntos de vista distintos, o con la

misma antena en dos momentos diferentes. Además, mientras que la estereoscopia necesita una larga línea de base entre dos puntos de vista (unos pocos centenares de kilómetros), en la interferometría se prefiere una línea de base corta (varios centenares de metros). En la bibliografía pueden encontrarse centenares de referencias acerca de los métodos, algoritmos, evaluación de la precisión, etc. Algunos libros de reseña (Leberl, 1990; Polidori, 1996; *Manual of Remote Sensing*, 1998) o artículos (Gabriel and Goldstein, 1988; Buchroithner, 1989; Polidori, 1991; Polidori *et Toutin*, 1998; y otros) describen diversos aspectos de la construcción de modelos de altura a partir de datos SAR de satélites. Puede consultarse una reseña completa y actualizada de tipo general en Toutin (2000a) y en Massonnet (2000) para el caso particular de la interferometría.

El objetivo de este artículo no es presentar una idea general sino solamente un panorama acerca de la construcción de MDE a base de datos de RADARSAT. Se proporcionan algunos antecedentes describiendo el uso de la estereoscopia y de la interferometría, para extraer de estos datos información sobre la altura del terreno. También se dan algunos ejemplos que ilustran los dos enfoques y las precisiones ordinarias obtenidas con cada método. Por último, se presentan algunas recomendaciones sobre el uso de datos de RADARSAT y productos para la construcción de MDE mediante métodos estereoscópicos e interferométricos.

## **Estereoscopia**

La disparidad binocular y la convergencia son las dos características fisiológicas en las que se basa la construcción de las imágenes estereoscópicas. Este principio de disparidad binocular se utiliza en la radargrametría, calculando la elevación del terreno a partir de las paralajes medidas entre dos imágenes. La disparidad binocular predomina al examinar imágenes de radar, pero los efectos psicológicos (p.ej., sombreado y sombras) influyen de forma intensa y acumulada en la formación de imágenes estereoscópicas de radar. Por ejemplo, sobre un terreno casi llano, los efectos de sombreado y sombras superan la disparidad binocular al examinar un par estereoscópico de imágenes de radar por pseudoscopia, lo que es una inversión aparente del relieve natural al invertir la posición de observación de las dos imágenes (Toutin and Amaral, 1999). Debido a los aspectos geométricos y radiométricos de las imágenes SAR, nuestro cerebro necesita algún tiempo para asimilar esta visión estéreo no natural, principalmente cuando son grandes las disparidades tanto geométricas como radiométricas (Toutin, 1995). Sin embargo, puesto que la percepción de la profundidad es un proceso activo (cerebro y ojo) y depende de una relación íntima con el reconocimiento de los objetos, las imágenes de radar pueden verse en estereoscopia, a medida que se adquiere experiencia con la facilidad con la que se observan las imágenes de satélite, en el visible e infrarrojo (VIR) (Toutin and Vester, 1999).

## ***Aplicación a los sensores SAR y a RADARSAT***

En la década de 1960, fueron aplicados por primera vez métodos estereoscópicos a las imágenes de radar, para obtener la elevación del terreno, lo que llevó al desarro-

llo de la radargrametría (La Prade, 1963). Éste demostró que algunas configuraciones estéreo SAR concretas producirían las mismas paralajes de elevación que las producidas por las fotografías aéreas. Por consiguiente, podría obtenerse la elevación en las trazadoras estereoscópicas tradicionales. Estos datos pueden ser utilizados a continuación para medir la elevación de los blancos. Más tarde, Carlson (1973) elaboró una técnica de trayecto único para generar imágenes de radar en estereoscopia, con la que era más fácil observar y medir la paralaje para el cálculo de la elevación que con la técnica tradicional de doble trayecto. Sin embargo, la ausencia de pares estereoscópicos de radar llevó principalmente a estudios teóricos (Rosenfield, 1968; Gracie *et al.*, 1970; La Prade, 1970; Leberl, 1979) o a experimentos de procesamiento de datos simulados (Kaupp *et al.*, 1983; Domik, 1984).

En la década de 1980, las mejoras de los sistemas SAR y las investigaciones teóricas, permitieron demostrar las capacidades estereoscópicas de las imágenes de radar con observación del mismo lado o del lado opuesto. Estos estudios teóricos (Leberl, 1976) y experimentos prácticos (Fullerton *et al.*, 1986; Toutin, 1996) confirmaron que la configuración estereoscópica del lado opuesto es superior a la configuración estereoscópica del mismo lado. En la Figura 1 se ilustra esta diferencia y superioridad, mostrando la geometría de intersección con la paralaje radar debida a la elevación para distintas configuraciones estereoscópicas (el mismo lado en comparación con el lado opuesto; ángulos de observación pronunciados en comparación con ángulos de observación pequeños). Las limitaciones en el uso de estas configuraciones geométricamente superiores, proceden de las diferencias de iluminación que son demasiado grandes para ser observadas en estereoscopia y de la dificultad de encontrar los puntos y características homólogos.

Para obtener una buena geometría que mejore la construcción (y trazado) estereoscópica, el ángulo de intersección (Figura 1) debe ser lo suficientemente grande como para aumentar el factor de exageración estereoscópico o, de modo equivalente, la paralaje observada que es utilizada para determinar la altura del terreno. Inversamente, para tener una buena visión estereoscópica, los interpretadores (o la correlación de imágenes) prefieren un par estereoscópico que sea, en lo posible casi idéntico, lo cual implica un ángulo pequeño de intersección. Por consiguiente, las grandes disparidades geométricas y radiométricas impiden la visión estereoscópica y la construcción (y trazado) estereoscópica precisa. Puesto que la disminución de una disparidad puede compensar la otra disparidad, se puede llegar a una solución de compromiso entre una mejor visión estereoscópica (pequeñas diferencias radiométricas) y una geometría y trazado más fuertes (paralaje grande).

La solución de compromiso más común para cualquier clase de relieve es utilizar un par estereoscópico del mismo lado, con el que se reducen ambas disparidades. Desafortunadamente, de esta forma no se aprovecha al máximo el potencial pleno del radar en estereoscopia para cualquier topografía. Para que disminuya la diferencia radiométrica de un par estereoscópico del lado opuesto, puede invertirse la radiometría de una imagen (Yoritomo, 1972; Fullerton *et al.*, 1986). Fullerton *et al.*, (1986), al procesar imágenes digitales, añadieron un cambio de brillo local para excluir de la inversión radiométrica, algunas características de la imagen. También

puede utilizarse para reducir la disparidad geométrica una baja frecuencia o un MDE dispersado, lo cual se ha aplicado con éxito para la correlación iterativa jerárquica de las imágenes SAR (Simard *et al.*, 1986). Otra posible solución de compromiso consiste en utilizar un par estereoscópico del lado opuesto para el caso de una topografía ondulada (Toutin, 1996). La topografía ondulante reduce la diferencia de paralaje y también las disparidades radiométricas (ninguna superposición, sombras y poco acortamiento anterior) lo que posibilita la visión y una buena construcción (y trazado) estereoscópica.

Con las plataformas espaciales, son muy raros los vuelos en paralelo (desde el lado opuesto o del mismo lado), e incluso las órbitas de los satélites heliosincrónicos son solamente paralelas cerca del Ecuador. En otras latitudes, deben considerarse líneas de vuelo cruzadas o una configuración estereoscópica convergente. No existe ninguna diferencia entre los cálculos para líneas de vuelo paralelas y aquellos para líneas de vuelo cruzadas, si se aplica rigurosamente la geometría de intersección. Esto ha sido confirmado con las misiones de la nave espacial SIR-A/B de 1981 y 1984 (Kobrick *et al.*, 1986; Leberl *et al.*, 1986a; Simard *et al.*, 1986). En los primeros estudios se procesaron las fotografías de radar en una trazadora estereoscópica analítica, Kern DSR-1, que se adaptó para procesar imágenes SAR estereoscópicas (Raggam and Leberl, 1984). En el último estudio fue empleado un método completamente digital con correlación jerárquica iterativa. Los resultados logrados para la precisión del DMA fue del orden de 60 a 100 m, debido principalmente a la escasa resolución del SIR-A, o a la calidad radiométrica y geométrica de las imágenes. Además, el sistema SIR-B SAR fue el primer sistema espacial con el que se obtuvieron pares estéreo con ángulos de intersección que variaban desde 5° a 23° (Leberl *et al.*, 1986b).

Con el lanzamiento de diversos sensores SAR por satélite (Almaz, ERS, JERS, etc.), a partir del inicio de la década de 1990, la radargrametría se convirtió una vez más en un tema de I&D. En primer lugar, el sistema ruso Almaz-1 con SAR captó imágenes estereoscópicas de distintos ángulos en la gama de latitudes de 0° a 72°. Yelizavetin (1993) procesó digitalmente dos imágenes a ángulos de observación de 38° y de 59° sobre la zona montañosa de Nevada, E.U.A. No se proporcionaron los resultados cuantitativos. Se obtuvo estereoscopia con datos ERS-SAR aplicándose una imagen con un ángulo normal de observación (23°) y una segunda imagen con un ángulo en modo de balanceo-inclinación (35°) para generar un par estereoscópico del mismo lado (Raggam *et al.*, 1993; Twu and Dowman, 1996). Esta estereoscopia con datos ERS-SAR puede también obtenerse con dos imágenes a ángulo de observación normal (23°) desde órbitas ascendentes y descendentes que generan un par estereoscópico de lado opuesto (Toutin, 1996). La comparación de la precisión de esta investigación confirmó la superioridad del par estereoscópico de lado opuesto: 20 m en comparación con 40 m (Marinelli *et al.*, 1997). Con el sistema JERS-SAR, se ha logrado la estereoscopia mediante órbitas adyacentes que generan una pequeña superposición a un pequeño ángulo de intersección (Raggam and Almer, 1996). Subsiguientemente se utilizó un método de correlación digital para generar un MDE con una precisión de 75 m.

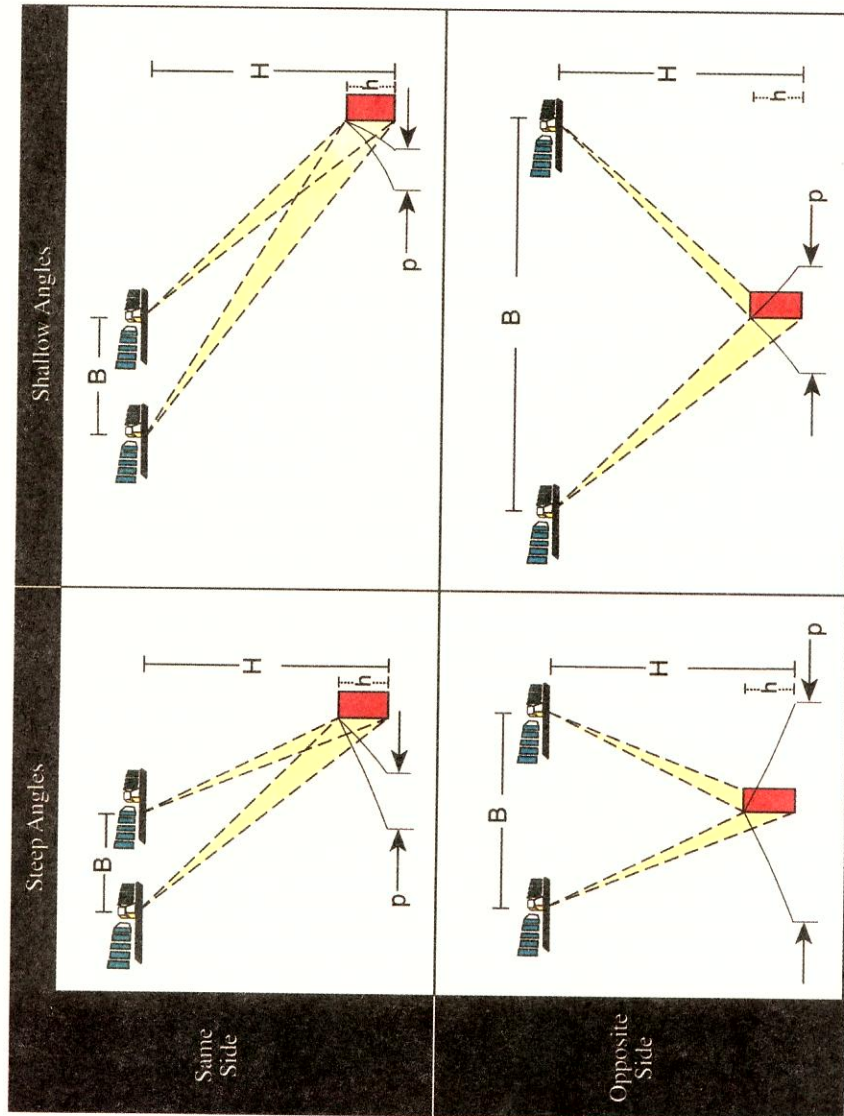


Figura 1. Diversas configuraciones de pares estéreo RADARSAT-SAR (el mismo lado y el lado opuesto; ángulos de observación pronunciados y pequeños).

Se s  
como :

1. Ka
- ap
2. Do
- va
- int
3. Le
- me
4. Fu
- lle
5. La
- (Fu

Esto  
claram  
sección  
varios  
inverso  
extrem

Por  
rollado  
el error  
con el e  
ron pri  
del misi  
ra la pr  
configu  
nadas tr  
a un err  
está dac

Siene  
respecti  
ángulos

Com  
los aspe  
de alcan  
del par

Se simularon estos resultados y los datos espaciales del SAR pueden resumirse como sigue:

1. Kaup *et al.* (1983) comprobó que los ángulos óptimos de intersección eran aproximadamente de 40°-45°;
2. Domik (1984) demostró que las mejores percepciones estereoscópicas subjetivas se obtenían con grandes ángulos de observación (50°-70°), y a un ángulo de intersección de 20°;
3. Leberl *et al.* (1986a, b) demostró que la máxima precisión no se logra necesariamente con los mayores ángulos de intersección;
4. Fullerton *et al.*, (1986) observó que una mejor resolución (en tierra) SAR no lleva necesariamente a una mayor precisión en cuanto a la altura; y
5. La mejor precisión está más en consonancia con un par estéreo de lado opuesto (Fullerton *et al.*, 1986; Toutin, 1996; Marinelli *et al.*, 1997).

Estos resultados son contradictorios y los experimentos prácticos no prestan claramente apoyo a las previsiones teóricas: por ejemplo, mayores ángulos de intersección y una mayor resolución espacial no se traducen en una mayor precisión. En varios experimentos, las tendencias en cuanto a la posición van incluso en sentido inverso, especialmente en el caso de topografías accidentadas. Solamente en el caso extremo de bajo relieve, la precisión se acerca a las previsiones teóricas.

Por analogía con la fotogrametría, los análisis teóricos de los errores fueron desarrollados por primera vez por Rosenfield (1968) y La Prade (1970). Ellos relacionan el error de un elemento exterior de orientación en las imágenes izquierda y derecha con el error resultante del modelo estereoscópico. Estos primeros análisis se limitaron principalmente a errores absolutos y a la comparación de pares estereoscópicos del mismo lado y del lado opuesto. Leberl (1979) utilizó un enfoque más general para la propagación del error, señalando los errores relativos y absolutos de cualquier configuración estereoscópica. En resumen, una estimación del error en las coordenadas transversales a la trayectoria y de elevación  $E_x$  y  $E_h$  respectivamente, debido a un error de alcance,  $E_r$  para la medición de un blanco en el modelo estereoscópico está dada por:

$$E_x = [(\cos^2 \theta_L + \cos^2 \theta_R)^{1/2} / \sin \theta \Delta] E_r \quad (1)$$

$$E_h = [(\sin^2 \theta_L + \sin^2 \theta_R)^{1/2} / \sin \theta \Delta] E_r \quad (2)$$

Siendo  $\theta_L$  y  $\theta_R$  los ángulos de observación de las imágenes izquierda y derecha respectivamente, y  $\theta \Delta$  el ángulo de intersección, que es la diferencia entre los dos ángulos de observación.

Como se indica en las ecuaciones 1 y 2, el modelo de errores considera solamente los aspectos geométricos del SAR (ángulos de observación y de intersección, error de alcance) y hace caso omiso de los aspectos radiométricos (retrodispersión SAR) del par estereoscópico y del relieve. Por lo tanto, este modelo de propagación del



error solamente puede ser aplicado cuando la radiometría desempeña una función de menor importancia y repercute menos en la geometría, tal es la construcción del modelo estereoscópico con puntos de apoyo (GCP en inglés), que son blancos radiométricamente bien definidos (Sylvander *et al.*, 1997; Toutin, 1998). Por lo tanto, los errores residuales del ajuste de media cuadrática del modelo estereoscópico están correlacionados con el ángulo de intersección.

Puesto que la retrodispersión SAR y, por consiguiente, la radiometría de la imagen es mucho más sensible al ángulo de incidencia que la reflectancia VIR, especialmente con ángulos bajos de incidencia (Polidori et Toutin, 1998), la propagación teórica del error es una limitación importante como instrumento para predecir la precisión y para seleccionar los pares estereoscópicos de imágenes apropiados para generación del MDE. Por consiguiente, deben intentarse extrapolar con precaución los conceptos estereoscópicos VIR al SAR.

### *Procesamiento, métodos y errores*

Las distintas etapas de procesamiento para producir un MDE, utilizando pares estereoscópicos de imágenes, pueden describirse en términos generales de la forma siguiente:

1. Tomar los datos de las imágenes en estereoscopia con información suplementaria tal como las efemérides;
2. Recopilar los GCP para calcular o definir con mayor precisión la geometría del modelo estereoscópico;
3. Extraer la paralaje de elevación y calcular las tres coordenadas cartográficas mediante una intersección-estéreo en 3-D; y
4. Crear y procesar seguidamente el MDE (correlación, filtrado, edición en 3-D, etc.).

### *Adquisición de datos de imágenes estereoscópicas*

Las imágenes SAR son productos estándar en presentaciones de alcance inclinado o terrestre. Se generan digitalmente durante la fase posterior al procesamiento, a partir de la señal de datos SAR en bruto (frecuencia Doppler, retardo de tiempo). La presentación en alcance terrestre es el producto más popular, puesto que el espaciado del pixel en tierra es aproximadamente el mismo para las imágenes con distintos ángulos de observación. Se facilitan así la visión y la correlación estereoscópica. La solución del modelo paramétrico para calcular el modelo estereoscópico y la intersección en 3D se inicia generalmente a partir de las ecuaciones tradicionales de Doppler y las distancias (Twu and Dowman, 1996; Sylvander *et al.*, 1997), a partir de ecuaciones de radargrametría (Leberl, 1990), o a partir de ecuaciones de proyecciones generalizadas para diferentes sensores de barrido (Toutin, 1995). Sus desarrollos matemáticos son distintos y dependen también del método aplicado (estación de trabajo-estereoscopia analítica o digital, correlación digital o visual de imágenes, etc.).

### *Recopilación de los puntos de control (GCP)*

Sea cual fuere el modelo geométrico SAR utilizado para el modelo estereoscópico y para la intersección en 3D, algunos GCP han de adquirirse para perfeccionar el modelo estereoscópico con un proceso de ajuste de media cuadrática, a fin de obtener una precisión cartográfica estándar. Puesto que el modelo polinómico no corresponde a la geometría de observación que requiere una dispersión de muchos GCP (20 y más) para todo el par estereoscópico completo. Por lo tanto, cada modelo de imágenes se calcula independientemente, lo cual no establece una orientación relativa entre las imágenes. Además se calcula la elevación a partir de una solución aproximada. Por consiguiente, no puede utilizarse este modelo para proporcionar una gran precisión cartográfica que es necesaria para la última generación de satélites tales como el RADARSAT.

Con los modelos paramétricos definidos anteriormente, se requieren pocos GCP (de 1 a 6). En un entorno operacional, su número variará en función de su precisión. Preferiblemente han de estar dispersos en los bordes del par estereoscópico para evitar una extrapolación en planimetría. También es preferible cubrir una gama completa de elevaciones del terreno. Pueden utilizarse diversos tipos de GCP:

- Puntos de control completo con coordenadas cartográficas XYZ conocidas;
- Puntos altimétricos con una coordenada de elevación Z conocida; y
- Puntos de enlace con coordenadas cartográficas desconocidas.

Los dos últimos tipos son útiles para reforzar la geometría estereoscópica y llenar las lagunas donde no existan GCP con valores XYZ. Además, los GCP presentados solamente en una imagen dentro o fuera del par estereoscópico pueden también usarse como puntos complementarios a los GCP "estéreo". Combinados con los puntos homólogos pueden también ayudar a evitar la extrapolación en planimetría en zonas en las que no hay GCP "estereoscópico".

La precisión final de la geometría estereoscópica depende principalmente de las coordenadas cartográficas y de imágenes (pixel-línea) de los GCP. Las primeras pueden obtenerse a partir de mediciones con GPS, levantamientos aerofotográficos, digitalización de mapas, etc. Se trazan las coordenadas de las imágenes interactivamente en la trazadora o en la pantalla. Puesto que algunas estaciones de trabajo no tienen funciones estereoscópicas completas, las coordenadas de las imágenes se obtienen simultáneamente en "monoscopia". Este trazado creará entonces paralajes X e Y (2-5 pixeles) entre las imágenes y los errores de paralaje se propagarán por el modelo estereoscópico (orientaciones relativas y absolutas), la intersección estereoscópica y por último, el MDE. La propagación del error puede ser grande en un par estereoscópico SAR, cuando la precisión del trazado es de aproximadamente 1-2 pixeles. Debido a la geometría del mismo lado con ángulos pequeños de intersección (8° a 20°) de los pares-estéreo SAR, la propagación del error debido al trazado simultáneo en "monoscopia" aumenta con grandes ángulos de observación y con ángulos más pequeños de intersección (Toutin, 1998). Por lo tanto, la preci-

sión del MDE puede disminuir a razón de un 20 a un 40%, dependiendo de la geometría del par estereoscópico (Toutin, 1999 y 2000b). El trazado estereoscópico verdadero, utilizando la percepción humana de la profundidad permite una mejor correspondencia relativa entre los GCP de las imágenes y una mejor determinación de la posición absoluta en tierra. Es también un requisito que las dos imágenes se calculen conjuntamente y no por separado, para tener una orientación relativa entre las mismas.

### *Extracción de la paralaje de elevación*

Para extraer la paralaje de elevación mediante la correlación ("matching" en inglés) de imágenes pueden utilizarse principalmente dos métodos: el método por computadora (visual) o el método automático. Evidentemente, estos dos métodos pueden integrarse para aprovechar las ventajas de cada uno. La correlación visual por computadora es una ampliación del método fotogramétrico tradicional para extraer datos de elevación (curvas de nivel) en una trazadora estereoscópica. Esto requiere tener todas las capacidades estereoscópicas para generar la reconstrucción tridimensional en línea del modelo estéreo y para la extracción en tiempo real de las características (detalles) planimétricas en 3-D y la elevación. Para la elevación, pueden generarse curvas de nivel o un MDE con una malla irregular. Se lleva a la práctica la observación estereoscópica en la pantalla de la computadora mediante un sistema óptico. Las imágenes estéreo se separan espacialmente, radiométrica o temporalmente. Se logra la separación espacial mediante el uso de dos monitores o una pantalla subdividida y un sistema óptico en el que se emplean espejos y/o lentes convexas. Se logra la separación radiométrica por técnicas de anaglifos o de polarización con lentes de colores o polarizadas, respectivamente. Se logra la separación temporal mediante una presentación alternada en pantalla de las dos imágenes y mediante lentes especiales sincronizadas (Toutin and Vester, 1999).

Para retener la visión real en 3-D en una estación de trabajo-estéreo, se obtienen repetidamente muestras de las imágenes en una geometría epipolar o casi epipolar en la que solamente se mantiene la paralaje X relacionada con la elevación. Otra solución para controlar la determinación de la posición de la imagen a partir de las imágenes en bruto, consiste en seguir automáticamente el cambio dinámico cancelando la paralaje Y, aplicando el modelo estéreo previamente calculado (Toutin, 1995). Del mismo modo que en la trazadora estereoscópica convencional, el operador cancela la paralaje X fusionando las dos marcas flotantes (una por imagen) en tierra. Seguidamente, el sistema mide la paralaje bi-dimensional entre las imágenes para cada punto y calcula las coordenadas cartográficas XYZ empleando la intersección en 3D. La correlación visual combina seguidamente en el cerebro un aspecto geométrico (fusionando conjuntamente las marcas flotantes) y un aspecto radiométrico (fusionando las marcas flotantes en el correspondiente punto de la imagen). Se añaden algunas tareas automáticas (desplazamiento de las imágenes o cursores, predicción de la posición del punto de la imagen correspondiente, etc.).

Sin embargo, la correlación visual por computadora (Raggam *et al.*, 1984; Toutin, 1995) es un proceso largo y de precio elevado para obtener un MDE. Cuando se emplean imágenes digitales, la correlación automatizada de la imagen puede por lo tanto ser utilizada. Puesto que la correlación de imágenes ha sido un tema candente de investigación en los últimos veinte años, existe acerca del tema una gran riqueza en trabajos de investigación y bibliografía.

La mayoría de los estudios de investigación sobre correlación de imágenes por satélite se basa en la investigación de David Marr en MIT, EUA, acerca de modelos de visión humana (Marr, 1982). Si puede llevarse a la práctica un programa de computadora para ver las cosas como las ve el hombre, entonces en el algoritmo debe haber alguna base obtenida a partir del procesamiento visual del hombre. La disparidad estéreo se basa en suposiciones "correctas" acerca del mundo real (Marr and Poggio, 1977): (i) un punto en la superficie tiene cada instante una posición única en el espacio, y (ii) la materia es coherente. La primera generación de correlación de imágenes basada en estas suposiciones es una correlación de imagen en niveles de gris. La correlación de los niveles de gris entre dos imágenes implica realmente que los datos de intensidad radiométrica de una imagen, representando un elemento particular del mundo real, deben correlacionarse con los datos de intensidad de la segunda imagen, que representa al mismo elemento del mundo real.

Aunque las imágenes de satélite del mundo real, representadas por niveles de gris, no son como un estereograma de puntos aleatorios (de correlación fácil), la correlación de los niveles de gris ha sido ampliamente estudiada y en parte aplicada a los datos SAR. La mayoría de los sistemas de correlación funciona por referencia y con ventanas de búsqueda. Para cada posición en la ventana de búsqueda se calcula un valor de correlación a partir de los valores de los niveles de gris en la ventana de referencia. El máximo local de todos los valores de correlación calculados en la ventana de búsqueda es la posición espacial del punto buscado. Puede calcularse el valor de correlación con el coeficiente de correlación cruzada normalizado (Simard *et al.*, 1986), la suma de las diferencias medias absolutas que han sido normalizadas (Ramapriyan *et al.*, 1986), el cambio de signo estocástico o el estimador de número mínimo externo, etc. El primer método se considera el más preciso (Leberl *et al.*, 1994) y se utiliza ampliamente con las imágenes de teledetección. También se observó que los errores de correlación eran más pequeños con imágenes SPOT y fotografías aéreas digitalizadas que con imágenes SAR. Los dos últimos métodos han sido o pocas veces o nunca utilizados por la comunidad de teledetección para calcular el valor de correlación.

Puesto que una de las limitaciones consistía en perder o aplicar incorrectamente la correlación de los niveles de gris, Marr elaboró una segunda generación de correlación de imágenes: correlación a base de rasgos ("feature-based matching" en inglés) (Marr and Hildreth, 1980). El mismo elemento del mundo real puede aparecer muy distinto en las imágenes SAR adquiridas en distintos momentos y con diferente geometría entre el sensor, la iluminación y el terreno. En su lugar, los bordes de las imágenes reflejan en general las estructuras verdaderas. En general (Marinelli *et al.*, 1997), la correlación basada en rasgos no ha sido muy popular con las imágenes

SAR porque la ubicación de los bordes ("edge location" en inglés) en un terreno montañoso puede verse desplazada de una imagen a otra.

Por lo tanto, pueden llevarse a la práctica enfoques mixtos para lograr resultados mejores y más rápidos combinando la correlación de niveles de gris y la correlación con base en rasgos con un algoritmo jerárquico a escala múltiple. Puede también utilizarse la correlación visual por computadora. El enfoque a base de rasgos puede dar buenos resultados para características conocidas, pero no para la elevación de puntos intermedios. Por lo tanto, estos puntos intermedios pueden ser utilizados como puntos germinales para la correlación de los niveles de gris. Otro enfoque mixto es generar imágenes de amplitud sucesiva en la primera etapa con valores de los niveles de gris obtenidos a partir de las imágenes estereoscópicas originales en lugar de imágenes de gradiente con sólo valores binarios de borde. En una segunda etapa puede ser utilizada cualquier técnica de correlación de los niveles de gris en estas imágenes preprocesadas (Paillou and Gelautz, 1998). El operador de gradiente lineal puede diseñarse en forma óptima para retirar el ruido ("speckle" en inglés) y para hacer resaltar los bordes. Los primeros resultados preliminares con las imágenes estereoscópicas SAR muestran una mejora del 10-15% en la construcción del MDE, no siempre significativa o uniforme, pero por lo menos con menos errores crasos, debido a la supresión del ruido.

Aunque la correlación visual por computadora es un proceso largo ha demostrado ser más precisa con los datos SAR (Leberl *et al.*, 1994; Toutin, 1999, 2000c). Por lo tanto, puede ser utilizada ya sea para eliminar errores crasos ("blunders" en inglés) o como complemento de la correlación falsa en áreas en las que esta correlación de imágenes automatizadas produce errores mayores que un pixel (aproximadamente del 40-50%, Leberl *et al.*, 1994). También puede ser utilizada para generar puntos germinales en la correlación de imágenes automáticas.

### ***Ejemplos de RADARSAT y recomendaciones***

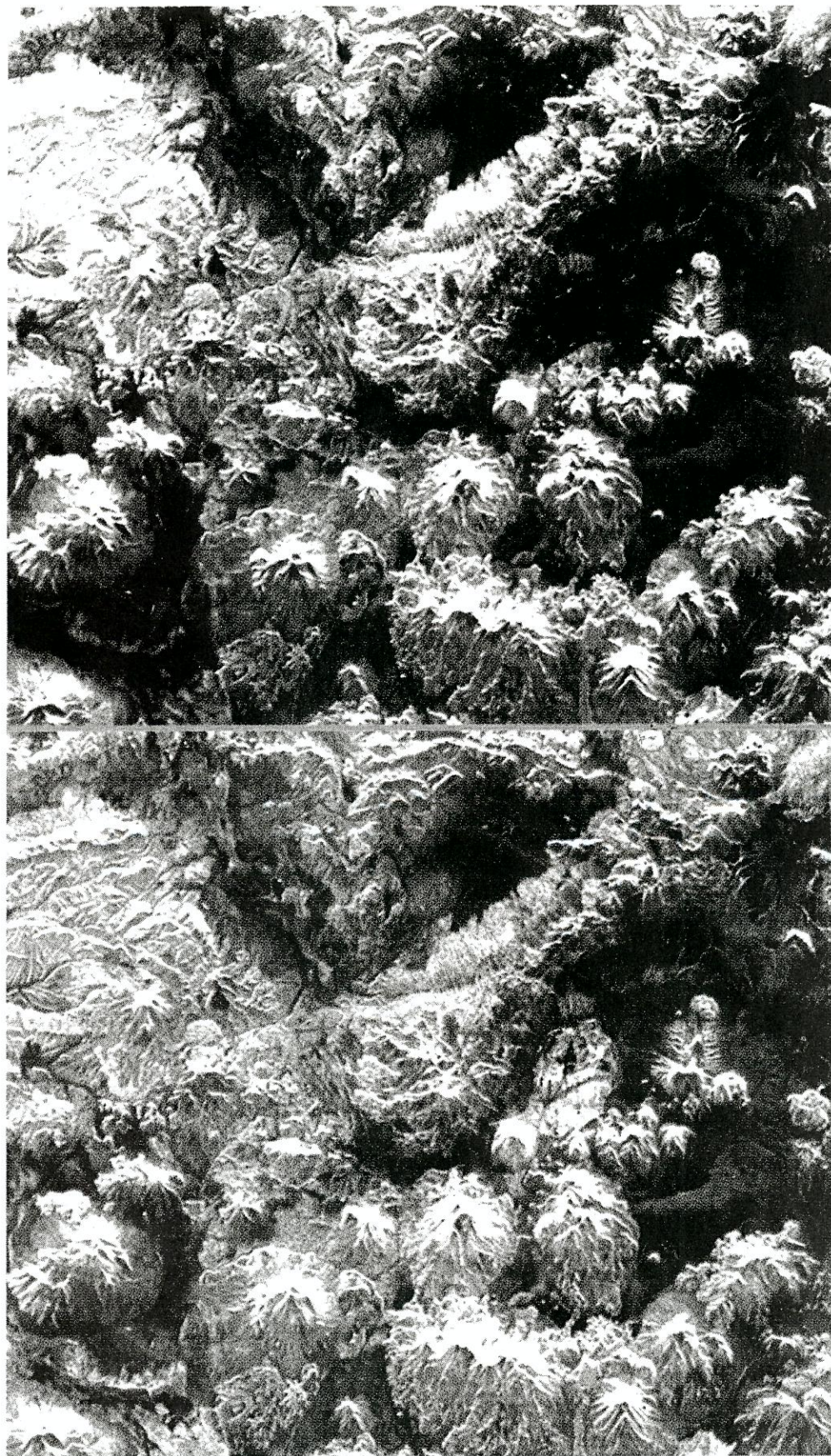
Antes de RADARSAT, el primer satélite canadiense de observación de la Tierra lanzado el 4 de noviembre de 1995, era difícil adquirir distintas configuraciones estéreo (Figura 1) para atender plenamente a la precisión de los MDE y para seguir la pista a la propagación del error. RADARSAT, con sus diversos modos operativos, puede proporcionar una riqueza de imágenes con una amplia gama de direcciones de observación, de posiciones del haz y en modos de diversas resoluciones (Parashar *et al.*, 1993) y, por consiguiente, llena esta laguna. En virtud del programa de "Applications Development and Research Opportunity" (ADRO) patrocinado por la Agencia Espacial Canadiense (CSA), investigadores de todo el mundo han emprendido estudios amplios acerca de las capacidades estereoscópicas de los satélites variando los parámetros geométricos (ángulos de observación y de intersección, resolución, etc.). Se han presentado la mayoría de estos resultados en el simposio ADRO de RADARSAT celebrado en Montreal, Canadá en 1998 (CSA, 1998). Existe un consenso general en los resultados de la precisión en la extracción de los MDE: un poco más que una célula de resolución para el modo fino (12 m) y algo mejor para el

modo estándar (20 m), sea cual fuere el método utilizado (trazadora estereoscópica digital o correlación de imágenes). Puede también atenderse a la extracción de la elevación relativa utilizando un modo fino de par estéreo radar SAR para medir las alturas de los árboles en las selvas tropicales de Brasil (Toutin and Amaral, 1999).

Sin embargo, no se registraron correlaciones importantes entre la precisión de los MDE y el ángulo de intersección o la relación de paralaje vertical (RPV) ("vertical parallax ratio" en inglés) (Toutin, 1999). De hecho, la mayoría de los resultados han demostrado que el parámetro principal que tiene un impacto significativo en la precisión del MDE es el tipo del relieve (y sus pendientes). Cuanto mayor sea la variación entre dos ángulos de observación (p.ej., 23° y 47° para S1-S7, respectivamente), tanto más se deteriorará la calidad de la fusión estereoscópica. Esto cancela la ventaja obtenida con una mejor geometría estéreo. Por otro lado, aunque una mayor resolución (modo fino) produce una imagen de mejor calidad, esto no modifica la agudeza estéreo de una determinada configuración (p. ej., F1-F5 en comparación con S4-S7), y no mejora significativamente la precisión del MDE. Además, aunque el ruido crea alguna confusión en la trazadora estereoscópica, no degrada la precisión del MDE puesto que el método de correlación o la visión estéreo humana "se comporta como un filtro". El procesamiento previo de las imágenes con un filtrado del ruido adaptable no mejora la precisión de los MDE (Dowman *et al.*, 1997); sin embargo, reduce ligeramente el contraste de la imagen y suaviza el relieve (especialmente el relieve bajo) (Toutin, 1999).

Un ejemplo de uso de RADARSAT para la extracción de MDE se muestra en las Figuras 2 a 5 del proyecto Multi-Andino de Bolivia (Lizeca *et al.*, 1999). En la Figura 2 se muestra el par estéreo en modo estándar (S3 y S6 adquiridos el 23/08/98 y 27/03/97, respectivamente; órbita descendente; alcance terrestre; 12.5-m espaciado de pixel) utilizado para el proyecto, mientras que en la Figura 3 se muestra el MDE de extracción estéreo mediante correlación automática con la superposición de curvas de nivel a 100-m. El MDE ha sido generado utilizando el método elaborado en CCRS (Toutin, 1995) y llevado al soporte lógico OrthoEngine<sup>SE</sup> de PCI (PCI Enterprises Inc., 1998). En las Figuras 4 y 5 se proporcionan ejemplos de productos de valor añadido tales como la imagen cromoestereoscópica 3D (espaciado de pixel de 25-m) y la imagen de visión en perspectiva (espaciado de pixel 25-m), generado respectivamente a partir de la imagen ortorrectificada S6 de RADARSAT y del MDE extraído en estéreo.

Puesto que no se disponía de datos verdaderos de terreno para verificar la precisión del MDE del proyecto Multi-Andino, en la Tabla 1 se proporciona un resumen de los resultados de precisión obtenidos a partir de diez imágenes estereoscópicas RADARSAT sobre un emplazamiento canadiense para un estudio de la topografía ondulada. Se generaron los MDE con los mismos métodos, etapas de procesamiento y soporte lógico, pero en un entorno de IyD mejor controlado (Toutin, 1999). Además de la totalidad de los MDE por encima del emplazamiento de estudio, se investigaron también dos subzonas de topografía baja (pendientes de 0° a 10°) y moderada (pendientes de 10° a 30°) para evaluar el impacto del relieve. La Tabla 1 presenta el LE90 (error de elevación con el 90% de confianza), el error sistemático, los valores



**Figura 2.** Par estéreo en modo estándar (S3-S6; órbita descendente; alcance terrestre; espaciado de 12.5-m pixel) utilizado en el Proyecto Multiandino. Imágenes RADARSAT: © CSA 1997, 1998; recibido y distribuido por RADARSAT International.

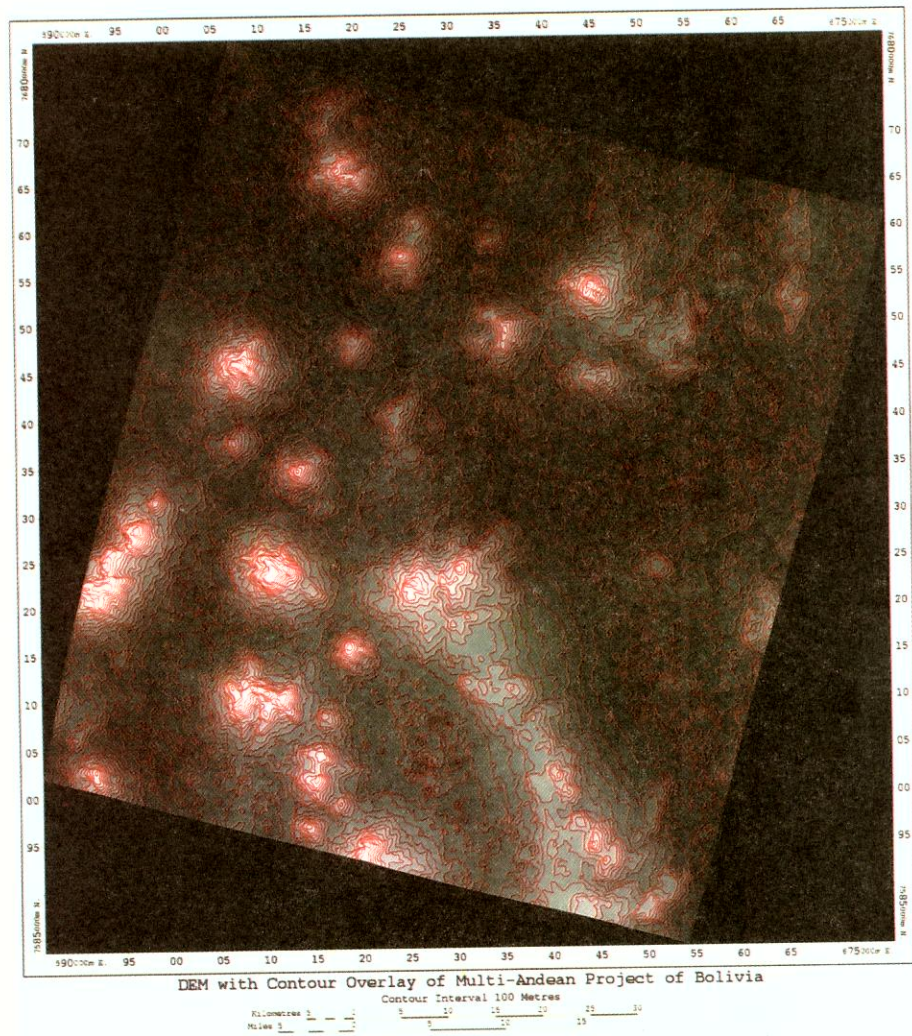
máximo y mínimo en metros para relieve bajo y moderado. Los dos últimos pares son los mismos con configuración de lado opuesto (ángulo de intersección de 89°) creados desde órbitas ascendente (asc.) y descendente (desc.). Además, se realizó un procesamiento previo radiométrico con un filtro de moteado adaptativo para evaluar el impacto de la reducción de disparidad radiométrica para esta configuración estéreo (ambas diferencias máximas de paralaje y radiométrica).

Las diferencias radiométricas debidas a las características de emplazamiento de estudio, con relieve moderado, son uno de los factores que repercuten en la correlación automática de las imágenes para calcular el coeficiente de correlación máxima,

**Tabla 1**  
**Resultados de error de los DEM obtenidos en un lugar de estudio canadiense**

<i>Par estéreo</i>	<i>Relación de paralaje vertical</i>	<i>Tipo de relieve LE90</i>	<i>Confianza 90%</i>	<i>Error sistemático</i>	<i>Valor mínimo</i>	<i>Valor máximo</i>
F2-F4 Mismo lado	0.15	Bajo	24 m	-4.5 m	-51.2 m	58.2 m
		Moderado	27 m	11.8 m	-36.2 m	90.0 m
		DEM completo	33 m	-7.3 m	-178.9 m	125.0 m
F5-F1 Mismo lado	0.30	Bajo	12 m	-13.3 m	-33.2 m	8.4 m
		Moderado	36 m	4.2 m	-39.6 m	95.0 m
		DEM completo	25 m	-1.1 m	-89.1 m	95.0 m
S7-H6 Mismo lado	0.32	Bajo	31 m	-50.4 m	-99.4 m	12.5 m
		Moderado	22 m	-57.5 m	-106.0 m	-6.0 m
		DEM completo	56 m	-76.3 m	-221.5 m	62.0 m
S4-S7 Mismo lado	0.39	Bajo	24 m	25.8 m	-16.1 m	58.6 m
		Moderado	46 m	-6.5 m	-81.2 m	42.6 m
		DEM completo	45 m	-1.3 m	-126.0 m	150.3 m
S4-H3 Mismo lado	0.59	Bajo	23 m	11.7 m	-101.7 m	42.0 m
		Moderado	59 m	-18.0 m	-116.6 m	42.0 m
		DEM completo	54 m	-21.9 m	-161.8 m	82.0 m
S1-S4 Mismo lado	0.97	Bajo	15 m	-17.1 m	-40.2 m	16.2 m
		Moderado	29 m	10.9 m	-23.0 m	66.6 m
		DEM completo	23 m	-11.9 m	-81.0 m	82.0 m
S2-S7 Mismo lado	0.99	Bajo	16 m	-19.3 m	-44.2 m	13.0 m
		Moderado	43 m	-2.0 m	-64.7 m	61.0 m
		DEM completo	39 m	-33.9 m	-148.7 m	61.0 m
S1-S7 Mismo lado	1.37	Bajo	11 m	-3.7 m	-22.0 m	25.3 m
		Moderado	27 m	6.6 m	-32.0 m	65.6 m
		DEM completo	14 m	-5.0 m	-61.0 m	71.3 m
F4-F5 Lado opuesto	1.97	Bajo	16 m	-15.0 m	-108.6 m	19.1 m
		Moderado	107 m	-7.4 m	-179.0 m	199.0 m
		DEM completo	34 m	-11.8 m	-312.7 m	199.0 m
F4-F5 Lado opuesto filtrado	1.97	Bajo	21 m	-17.4 m	-52.4 m	36.8 m
		Moderado	77 m	-2.2 m	-132.2 m	132.8 m
		DEM completo	47 m	-14.3 m	-289.5 m	260.1 m





**Figura 3.** MDA de extracción estéreo con las líneas de nivel a 100-m superpuestas generadas a partir del par estéreo del Proyecto Multiandino utilizando soporte lógico PCI OrthoEngineSE.

particularmen  
S7). Por encin  
reduciría a ur  
como S3-S6 (c  
ambas imágen  
de diferencias  
y de la superfi  
te, la correlac  
correlación vi  
radiométricas  
sual por comp

Puede obser  
bajo, moderac  
en la precisión  
dependen de c  
dad, rugosidad  
repercutir en  
estereoscópico  
radiométricas  
en la señal de  
más, la imagen  
dente de camp  
un desplazami

Inversamer  
relieve para S  
nes. Un posibi  
ser que las fec  
mencionó ante  
debidas a la in  
tación y del sue  
que explicaría  
valores mín/m  
S2-S7 y S1-S7  
inglés). Un ma  
ambigüedad.

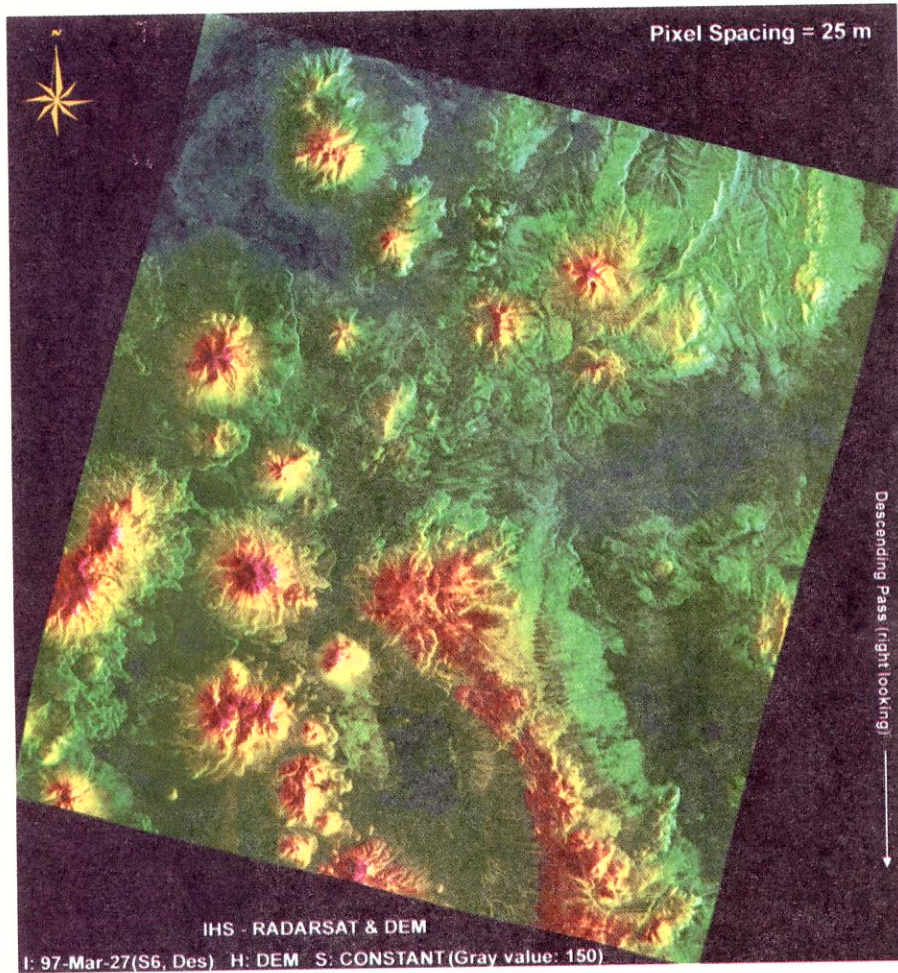
Con los pa  
mente el contr  
(-17 m en com  
en el relieve m  
Sin embargo, c  
m y 47 m), det  
casos, da mejo  
servación supe  
cias radiométri

particularmente para pares estéreo con grandes ángulos de intersección (p. ej., S1-S7). Por encima del terreno escarpado esto se destacará y la selección del par estéreo reduciría a un mínimo las diferencias radiométricas entre las dos imágenes, tales como S3-S6 del proyecto Multi-Andino. La separación temporal para la toma de ambas imágenes, que no es de importancia con imágenes VIR, es también una fuente de diferencias radiométricas debido a posibles cambios en la interacción del SAR y de la superficie (tales como cambios de la vegetación y del suelo). Por consiguiente, la correlación automática es más sensible a disparidades radiométricas que la correlación visual. La ventaja geométrica ya no puede compensar las desventajas radiométricas acumuladas durante la correlación, tales como las de correlación visual por computadora.

Puede observarse, comparando los distintos resultados en las tres áreas (MDE bajo, moderado y completo), que el relieve no es el único parámetro que repercute en la precisión del MDE. Las grandes disparidades radiométricas en el par estéreo dependen de distintos criterios relacionados con el ángulo de observación (humedad, rugosidad, vegetación, etc.) y la diferencia en el momento de la toma pueden repercutir en la precisión del MDE. Por ejemplo, en las comparaciones de pares estereoscópicos S4-H3 y S7-H6 las imágenes H3 y H6 muestran más variaciones radiométricas puesto que el componente de vegetación tiende a ser predominante en la señal de retorno a ángulos grandes de incidencia (Boisvert *et al.*, 1997). Además, la imagen H6 (12 de enero de 1997) muestra un retorno bajo de la señal procedente de campos agrícolas helados. Del mismo modo, el par estéreo S2-S7 muestra un desplazamiento de relieve para S2 y no para S7 en relieve moderado.

Inversamente, las disparidades radiométricas "equivalentes" inducidas por el relieve para S1-S7 no repercutieron negativamente en la correlación de las imágenes. Un posible motivo del elevado porcentaje de puntos correlacionados pudiera ser que las fechas de toma fueron próximas (24 y 22 de octubre de 1996), según se mencionó anteriormente, con lo que disminuyeron las disparidades radiométricas debidas a la interacción del SAR con la superficie (tales como cambios de la vegetación y del suelo). Por lo demás, la geometría más propicia no sería el único parámetro que explicaría estos resultados (LE90 error vertical con 90%, error sistemático y valores mín/máx) puesto que la disminución (64%) del error MDE LE90 total entre S2-S7 y S1-S7 es superior a su aumento (38%) el RPV ("vertical parallax ratio" en inglés). Un mayor número de ejemplos con otras fechas de toma podría resolver esta ambigüedad.

Con los pares estéreo de lado opuesto, el filtrado del ruido, reduciendo ligeramente el contraste de la imagen, suaviza el bajo relieve para disminuir la precisión (-17 m en comparación a -15 m), pero reduce las mayores disparidades radiométricas en el relieve moderado para mejorar los resultados (77 m en comparación con 107 m). Sin embargo, estos pares estéreo dan buenos resultados en la totalidad del MDE (34 m y 47 m), debido al relieve general ondulado de este lugar de estudio y, en algunos casos, da mejores resultados que con pares estéreo del mismo lado y ángulos de observación superficiales (p. ej. S4-S7; S4-H3, S7-H6). En terreno escarpado, las diferencias radiométricas serán enormemente aumentadas con un par estéreo de lado opuesto



**Figura 4.** 3D imagen cromo-estereoscópica 3D (espaciado de 25-m pixel) generada a partir de la imagen ortorrectificada S6 y del MDA extraído en estéreo del Proyecto Multiandino.

y tanto las dife  
vación estéreo  
correlación. Pe  
lieve accident  
Sin embarg  
dencias (MDE

1. Con dispa  
estereoscó  
ración cor  
paración c
2. Con dispa  
mejores re  
con S2-S7

Los resultac  
mentos en las  
cuada de los pa  
dos imágenes  
glés) con áng  
respectivamen  
se seleccionó la  
procesaron cor  
pares estéreo, I  
te. Los resultac  
MDE derivado  
para el F1-F5 y  
ción de 50% e  
10% en la pre  
seleccionarse  
4°), solamente  
anterior no se  
principal de qu  
los grandes pa  
da, tales como

Puesto que  
se recomienda  
a distintas área  
neración de un  
y radiométrica  
(geometría de l  
ficas, fecha de  
pueden compe  
tación general

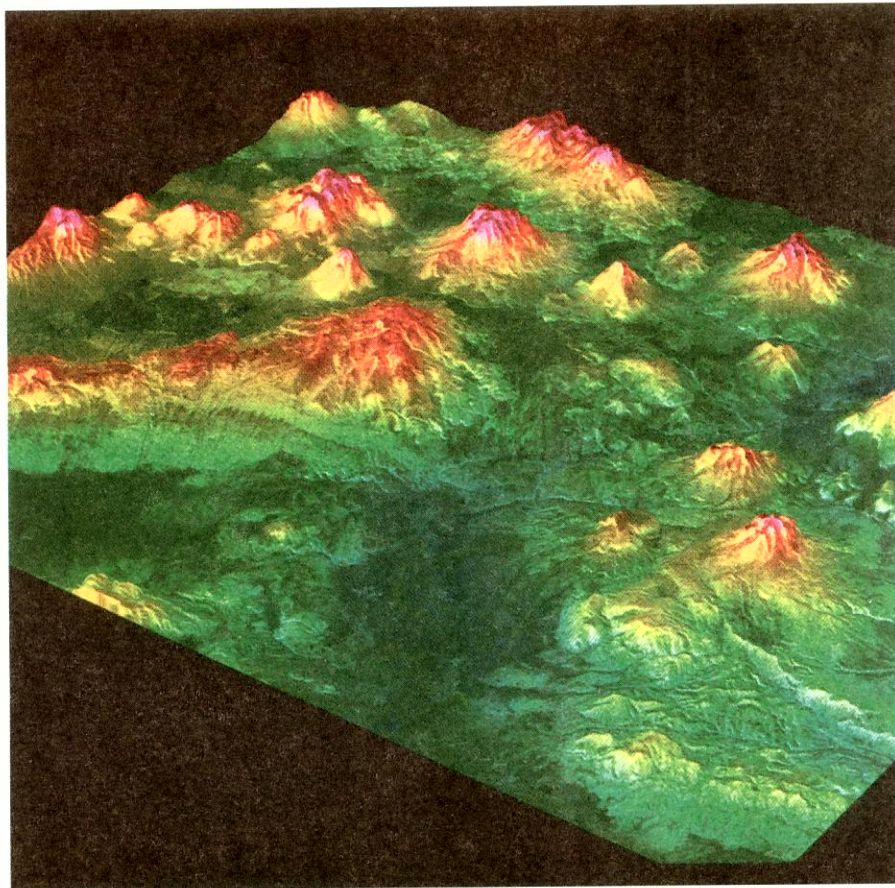
y tanto las diferencias grandes de paralaje como radiométricas impedirán la observación estéreo y generarán extensas áreas de correlación errónea en el proceso de correlación. Por la tanto, no se recomienda tal par estereoscópico para terrenos de relieve accidentado.

Sin embargo, de los resultados sobre estas dos zonas pueden detectarse dos tendencias (MDE en relieve bajo, moderado y completo):

1. Con disparidades geométricas equivalentes (el mismo RPV) el "mejor par" estereoscópico en radiométrico proporciona mejores resultados (F5-F1 en comparación con S7-H6; S1-S4 en comparación con S2-S7; F4-F5 filtrado en comparación con F4-F5 en el relieve moderado);
2. Con disparidades radiométricas equivalentes, la mejor geometría estéreo da mejores resultados (S1-S4 en comparación con S4-S7; S1-S7 en comparación con S2-S7; etc.).

Los resultados para terreno escarpado fueron obtenidos a partir de otros experimentos en las montañas rocallosas canadienses (Toutin, 2000b). La selección adecuada de los pares estéreo redujo a un mínimo las diferencias radiométricas entre las dos imágenes y el desplazamiento de cumbres del terreno ("terrain layover" en inglés) con ángulos de intersección pequeños y ángulos grandes de observación, respectivamente. Inversamente, para compensar, la geometría estéreo más débil, se seleccionó la resolución SAR en modo fino, aumentando la precisión del MDE. Se procesaron con los mismos métodos, etapas de procesamiento y soporte lógico, dos pares estéreo, F1-F5 y F2-F4 con ángulos de intersección de 8° y 4° respectivamente. Los resultados estadísticos de la comparación del MDE extraído en estéreo con el MDE derivado de un método topográfico preciso, muestran LE90 de 41 m y 45 m para el F1-F5 y F2-F4, respectivamente. Estos resultados muestran que una disminución de 50% en el ángulo de intersección llevó solamente a una disminución del 10% en la precisión, en grave contradicción con la teoría. Por lo tanto, pueden seleccionarse pares estéreo con ángulos pequeños de intersección (tales como de 4°), solamente con una pequeña pérdida de la precisión, aunque en un estudio anterior no se recomendaban tales pares estéreo (Sylvander *et al.*, 1997). El motivo principal de que se obtuvieran buenos resultados en terreno accidentado se debe a los grandes paralajes del terreno si se comparan con una topografía llana u ondulada, tales como las del otro estudio de Sylvander *et al.* (1997).

Puesto que el tipo de relieve es un parámetro importante en la precisión del MDE, se recomienda firmemente asignar a la precisión del MDE valores que correspondan a distintas áreas del relieve. Además, en la selección del par estereoscópico para generación de un MDE, deben evaluarse conjuntamente las características geométricas y radiométricas, teniendo en cuenta la interacción del SAR con la de la superficie (geometría de la superficie, vegetación, características del suelo, condiciones geográficas, fecha de adquisición de la imagen, etc.). Las ventajas de una característica pueden compensar las deficiencias de la otra. En la Tabla 2 se proporciona una orientación general para adquirir datos RADARSAT estéreo con fines de generación de



**Figura 5.** Imagen en perspectiva (espaciado de 25-m pixel) generada a partir de la imagen S6 cromostereoscópica 3D del Proyecto Multiandino superpuesta al DEM extraído en estéreo.

MDE en fun  
no es exclus  
sólo para la g  
y la utilizaci  
para que el u  
nientes. Por e  
F2-F5 si dese  
de transporte  
de estudio el  
mejor interpr

**Dis  
ventajas  
RADAR**

*Pendientes de  
relieve del  
terreno*

Disparidades  
radiométricas  
Disparidades  
geométricas  
Compensación

Configuración  
estéreo de  
RADARSAT

**Interferomet**

La interferon  
para extraer i  
utilizado par  
de un terrem  
movimiento  
digital de las  
samiento aut  
ción de imáge

MDE en función del relieve del terreno. Estas directrices muestran que la solución no es exclusiva porque en la mayoría de los casos las imágenes no son utilizadas sólo para la generación de MDE. Los requisitos para la aplicación prevista del MDE y la utilización temática de las imágenes son por lo tanto otros elementos inherentes para que el usuario final decida si determinadas ventajas compensan otros inconvenientes. Por ejemplo, un cartógrafo preferiría en un relieve montañoso el par estéreo F2-F5 si desea también extraer las características cartográficas tales como las redes de transporte. Inversamente, un geocientífico preferiría en el mismo emplazamiento de estudio el par estéreo S4-S7 (o S3-S6 del proyecto múltiple andino) para una mejor interpretación geomorfológica sobre un área más extensa de cobertura.

**Tabla 2**  
**Disparidades geométricas en comparación con las radiométricas,**  
**ventajas e inconvenientes y líneas generales para la selección de pares estéreo**  
**RADARSAT en la generación de DEM en función del relieve del terreno**

<i>Pendientes de relieve del terreno</i>	<i>Llano</i> 0-10°	<i>Ondulante</i> 10-30°	<i>Montañoso</i> 30-50°
Disparidades radiométricas	Pequeña	Media	Grande
Disparidades geométricas	Grande	Media	Pequeña
Compensación	Lado opuesto con ángulos de observación pequeños (cerca de la vertical)	Mismo lado con ángulo de intersección grande O (Lado opuesto con ángulos de observación grande)	Mismo lado con ángulo de intersección pequeña y ángulos de observación pequeños o grandes
Configuraciones estéreo de RADARSAT	S1desc-S1asc F1desc-F1asc	S1-S7 (desc o asc) F1-F5 (desc o asc) O (S7desc-S7asc F5desc-F5asc)	S1-S4 (desc o asc) S4-S7 (desc o asc) F1-F4 (desc o asc) F2-F5 (desc o asc)

### **Interferometría**

La interferometría radar es un método alternativo al estereoscópico convencional, para extraer información sobre la elevación relativa o absoluta. También puede ser utilizado para medir modificaciones de la escena como resultado, por ejemplo, de un terremoto, de una deformación volcánica, de una subsidencia del terreno o de movimiento de los glaciares. Se aprovechan los sistemas SAR y el procesamiento digital de las imágenes, las capacidades todo tiempo, nocturna y diurna, y el procesamiento automatizado y semiautomatizado. La interferometría radar para formación de imágenes combina las imágenes complejas grabadas mediante dos antenas

en diferentes lugares o con la misma antena en dos momentos distintos. La información sobre diferencia de fase entre las imágenes SAR se utiliza para medir cambios en el alcance, en la escala de sublongitudes de onda, en puntos correspondientes de un par de imágenes. Analizando las variaciones de fase, pueden convertirse estas distancias en elevación o desplazamiento sobre el terreno.

Se llevaron a la práctica las primeras propuestas y experimentos de interferometría radar en el campo de los mapas planetarios y en el contexto de astronomía radar (Rodgers and Ingalls, 1969). En estos casos se utilizó un sistema Doppler y alcance con base en la Tierra para trazar un mapa de Venus, y solamente se utilizó la información interferométrica para resolver la ambigüedad en el trazado de los mapas del hemisferio sur y del hemisferio norte. La primera aplicación sobre la Tierra fue realizada por Graham (1974) con dos antenas a bordo de una aeronave. Esta técnica "secreta" hasta 1980, se amplió más tarde a los datos SIR-B adquiridos en dos pasadas sobre varios días (Gabriel and Goldstein, 1988). Después del lanzamiento del ERS-1 en 1991, se han realizado estudios interferométricos por satélite de pasadas múltiples (Massonnet and Rabaute, 1993, Zebker *et al.*, 1994a), después con Almaz-1 (Yelizavetin and Ksenofontov, 1996) y con RADARSAT (Geudtner *et al.*, 1997). Con los datos SAR y con los satélites existentes, solamente el sistema de pasadas repetidas (una antena de satélite y dos pasadas) puede generar datos interferométricos mediante la combinación de imágenes complejas puesto que no existe en la actualidad ningún sistema de satélites con dos antenas. Está programado para finales de 2000 tal sistema de antena doble, es decir, la Misión topográfica radar de la nave espacial (SRTM).

### ***Selección de un par interferométrico apropiado***

La viabilidad de la interferometría por satélite con pasadas repetidas (InSAR) depende en gran manera de la selección adecuada del par de pasadas. Los dos criterios más importantes son la distancia entre las pasadas del satélite (o línea de base) y la coherencia. La geometría de formación de imágenes de la primera pasada debe repetirse casi exactamente en la segunda pasada. El concepto de línea de base crítica se introdujo para describir la separación máxima entre las órbitas del satélite en azimut cruzado, dirección de alcance cruzada (habitualmente mencionada como línea de base perpendicular). Si se excede de este valor, no podrían esperarse franjas claras de fase o "coherencia de fase" adecuadas. La línea de base crítica es función de la longitud de onda del sistema, de la distancia de la antena al blanco y del ángulo que la línea de alcance forma con la normal a la superficie. Por consiguiente, la variación depende del satélite y del modo utilizado. En el caso del ERS-1/2, la línea base crítica es de aproximadamente 1 km. Para el RADARSAT varía entre unos 700 m y 6 km, dependiendo del modo. La selección de una línea de base óptima dentro de los límites críticos de la línea de base es importante y dependerá de la aplicación de que se trate. Esto se analizará más adelante.

El concepto de coherencia de fase es crítico en interferometría. El grado de coherencia es una medida de la correlación entre dos escenas. Varía entre 0 y 1: represen-

tando el 0 una ausencia total de coherencia o marginal y representando el 1 la coherencia perfecta y márgenes claramente definidos. Es importante que el par interferométrico seleccionado tenga la coherencia adecuada. Desafortunadamente, en la mayoría de los casos, el grado de coherencia de un par InSAR no puede ser conocido hasta que el par haya sido procesado y se haya generado un interferograma. El grado mínimo aceptable de coherencia también depende del requisito de la aplicación concreta. La pérdida de coherencia puede deberse a que la línea base sea demasiado larga o a modificaciones temporales incoherentes en las dos escenas. Por ejemplo, los cambios en el mecanismo de dispersión debido al movimiento del agua o al vaivén de los árboles, o a cambios en la escena debidos a lluvia/humedad, o a artefactos de propagación atmosférica fuertes. La coherencia variará con la frecuencia y con el tiempo, y la experiencia con los datos de la banda C muestra que el índice de pérdida de coherencia varía ampliamente en función del terreno. Debido a la vegetación y a la humedad, incluso los datos en modo tandem de ERS en la banda C con una separación de un día, no han producido buenos resultados en las selvas tropicales pero en zonas secas han demostrado coherencia por muy largos periodos que son de hasta un año (Massonnet and Feigl, 1998). Puesto que RADARSAT tiene un ciclo de repetición de 24 días, éstos representan una limitación para explotar la interferometría aunque se han obtenido buenos resultados útiles en terrenos secos, rocosos y helados. También se ha demostrado que el uso de blancos "duros" concretos (p. ej., reflectores de esquina naturales o fabricados, etc.) pueden ampliar el periodo durante el cual pueden realizarse mediciones útiles, incluso si la mayoría de la escena ha perdido actualmente la coherencia debido a la vegetación (Usai and Klees, 1998).

En algunos casos, la imagen coherente puede también ser utilizada con provecho como identificación interferométrica para clasificar la utilización de los terrenos a partir de datos de pasadas repetidas del SAR del ERS-1 (Wegmüller *et al.*, 1995). La correlación interferométrica sobre zonas de bosques ha demostrado ser muy inferior a la obtenida sobre copas de árboles abiertas, vegetación pequeña, suelos áridos y zonas urbanas. Los resultados pueden ser de gran apoyo a los estudios de reforestación, al trazado de mapas de bosques y a su supervisión, puesto que es posible no solamente distinguir bosques de coníferas, caducifolios y mixtos, sino también zonas de repoblación forestal y zonas de tala.

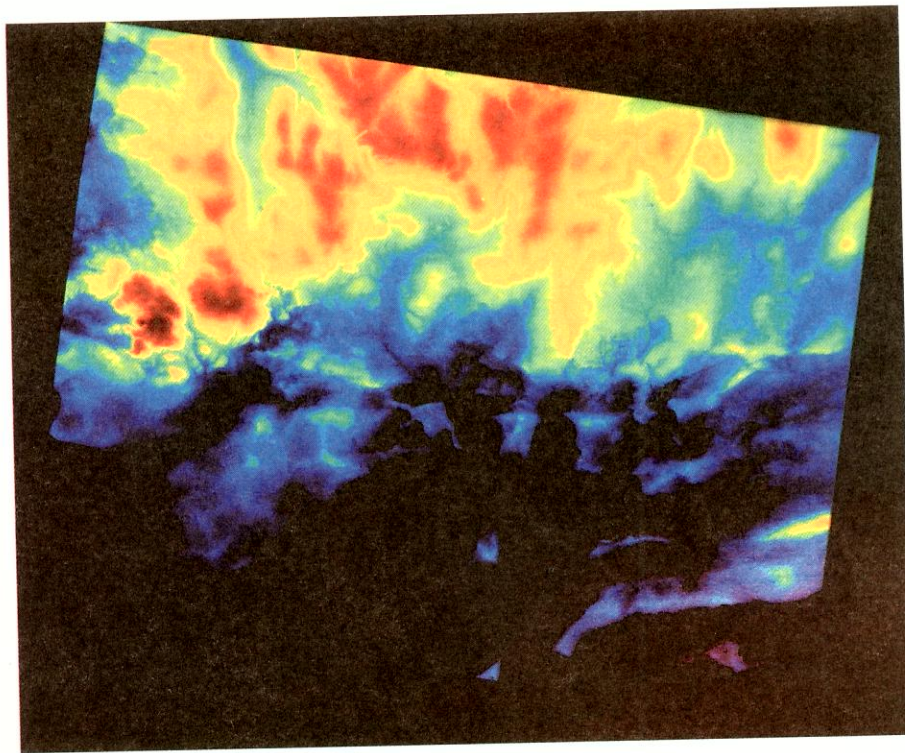
Después de seleccionarse del mejor modo posible, el par interferométrico puede iniciarse el procesamiento principal de los datos. Los detalles del procesamiento interferométrico escapan al alcance de esta nota de estudio y pueden consultarse en Massonnet and Feigl, 1995. El producto principal es el interferograma (magnitud de la imagen SAR y fase del interferograma o diferencia de fase), y el producto secundario es una imagen de coherencia. La fase del interferograma es una medida de la diferencia de trayecto en ambos sentidos de los ecos radar. Solamente se conoce con una ambigüedad  $2\pi$ , y por lo tanto, en la mayoría de los casos debe "desenvolverse" ("unwrapped" en inglés) antes de que pueda utilizarse (Goldstein *et al.*, 1988). La fase de interferograma tiene cuatro componentes: las fases topográfica, de desplazamiento, atmosférica y la del ruido del sistema.



### Generación del MDA

La fase topográfica es el componente del interferograma que es debido a la topografía. Es un componente que se utiliza para la obtención del MDE. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de MDE obtenido utilizándose un haz-fino, interferometría RADARSAT con pasadas repetidas cada 24 días y una línea de base de 1064 m. Al compararse con 199 puntos de control para triangulación aérea, se calculó un error sistemático de elevación de 3.2 m y un error de media cuadrática (RMS) de 6.5 m (MDE cortesía de Atlantis Scientific). La fase topográfica es proporcional al cambio de elevación del terreno y a la línea de base perpendicular e inversamente proporcional a la longitud de onda y a la distancia al blanco. Cuanto *mayor* sea la línea de base, *más* sensible será la fase topográfica a un determinado cambio de elevación y, a su vez, la fase topográfica será un componente relativamente *más* significativo de la fase general del interferograma. Como veremos más adelante, esto será útil al reducir los efectos no deseados del componente de fase atmosférica. Inversamente, cuanto *más pequeña* sea la línea de base perpendicular, *más insensible* será la fase topográfica a la topografía del terreno y, a su vez, la fase topográfica será un componente relativamente *menos* significativo de la fase general del interferograma. Como veremos más adelante, esto será útil para aplicaciones en la que la medición del desplazamiento es el objetivo. La opción de la línea de base óptima perpendicular para generar un MDE dependerá también hasta cierto punto del relieve del terreno. Una línea de base larga (dentro de las restricciones impuestas por la línea de base crítica) con pendientes moderadas o grandes, generará un índice de fase perturbada o una fase que será difícil de procesar en etapas subsiguientes, p. ej., desenvolvimiento de fase.

En principio, la conversión de fase a altura puede completarse sin recurrir a puntos de control en tierra. Sin embargo, en la práctica, la posición del satélite no es conocida con suficiente precisión y algunos puntos de control en tierra son importantes para mejorar la información sobre la órbita. Se utilizan normalmente GCPs para perfeccionar el modelo de línea de base utilizado en el algoritmo de conversión de fase a altura. En un minucioso estudio sistemático de la topografía del radar de InSAR (Pequeña *et al.*, 1995), los errores RMS al determinar la altura fueron de 2.7 m en una zona relativamente pequeña (12 por 13 km, bajo relieve) cercana a Bonn, Alemania. Además, se observaron algunos pequeños errores sistemáticos en una escena de más de 40 por 50 km con ERS-1. Las precisiones RMS en áreas de alto relieve pueden ser incluso más desfavorables, especialmente si hay poca coherencia debido a la presencia de bosques y vegetación. Las lagunas de datos pueden también ser el resultado de sombras y desplazamiento de cumbres del radar, lo cual ocurre cuando la cima de una montaña está más cerca del radar que la base. La presencia de condiciones de propagación atmosférica no homogénea en el momento de la adquisición de los datos, así como una falta de correlación temporal influye negativamente en la fase diferencial y en el MDE resultante.



**Figura 6.** DEM de Isla Bathurst Island obtenida con interferometría de modo-fino de RADARSAT (F5; órbita descendente; 4 de marzo y 28 de marzo, 1996; línea de base = 1064 m) (cortesía, Atlantis Scientific.)

gráfica 71

topogra-  
gura 6 se  
rometría  
64 m. Al  
un error  
de 6.5 m  
al cambio  
e propor-  
a línea de  
vacación y,  
icativo de  
útil al re-  
rsamente,  
erá la fase  
in compo-  
na. Como  
dición del  
pendicular  
el terreno.  
ea de base  
perturbada  
olvimien-

recurrir a  
télite no es  
son impor-  
ente GCPs  
conversión  
el radar de  
eron de 2.7  
na a Bonn,  
cos en una  
eas de alto  
coherencia  
ueden tam-  
lar, lo cual  
la base. La  
el momen-  
oral influye

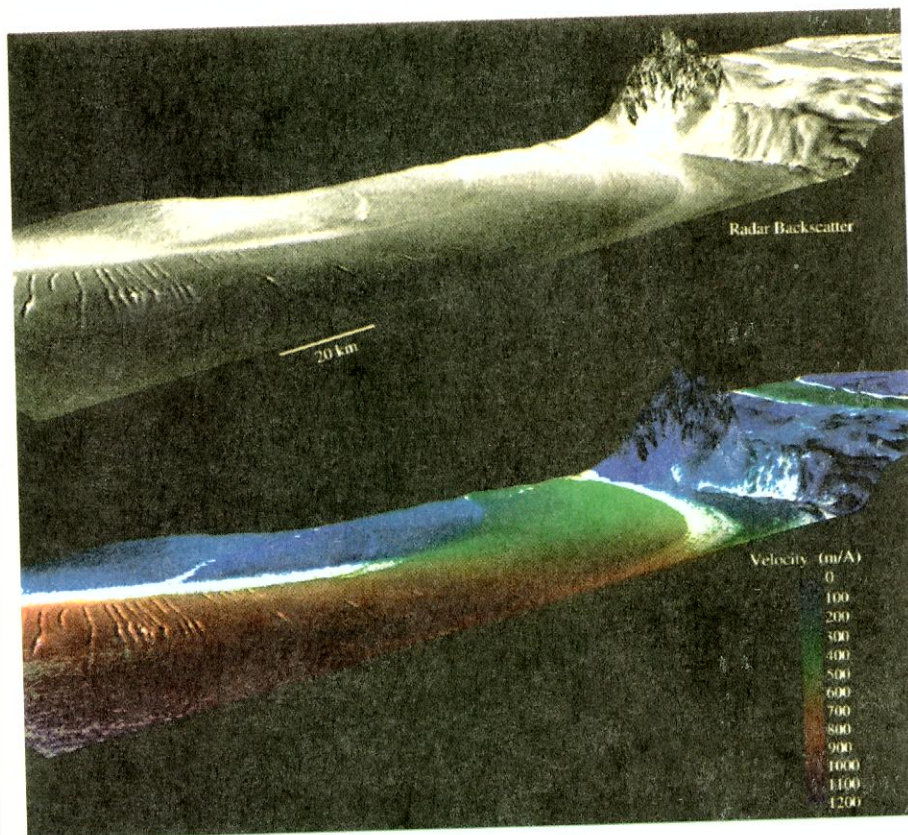
### *Medición del desplazamiento*

La fase de desplazamiento es el componente que se debe a un desplazamiento coherente en línea óptica de la célula de resolución en tierra. Es el componente de fase del interferograma que se utiliza para estudiar fenómenos dinámicos y sus desplazamientos relativos. Generando, por ejemplo, un interferograma SAR a partir de dos archivos de datos SAR de ERS-1, adquiridos antes y después de un terremoto, y retirando el componente de fase topográfica con un MDE, puede trazarse el mapa de campo de desplazamiento de un terremoto (Massonnet *et al.*, 1993). Si no se dispone de ningún MDE apropiado, pueden separarse los componentes topográficos y de desplazamiento, combinando tres imágenes radar para generar dos interferogramas con la hipótesis de que el desplazamiento permaneció constante durante el periodo en que fueron tomadas las tres imágenes de radar (Zebker *et al.*, 1994b). La estimación del campo de desplazamiento utilizando solamente los datos de radares, por lo tanto, posible sin ninguna información topográfica. De modo análogo, utilizando la interferometría de trayecto repetido con una línea de base perpendicular muy pequeña, misma que genera un interferograma de poca sensibilidad a la topografía (componente topográfico pequeño), Goldstein *et al.* (1993) puede medirse y estimarse el movimiento de capas de hielo.

La fase de desplazamiento mide solamente el movimiento que está presente en el sentido de la línea de alcance del radar. Pueden medirse desplazamientos bidimensionales utilizando dos pasadas casi perpendiculares sobre la misma escena (tales como una pasada ascendente y una descendente). La medición del desplazamiento tridimensional solamente es posible, por lo menos en el caso de interferometría radar por satélite, utilizando tres pasadas distintas sobre la misma escena o dos pasadas con una hipótesis apropiada en cuanto al desplazamiento.

Para blancos de movimiento rápido puede calcularse directamente el desplazamiento bidimensional a partir de dos imágenes interferométricas coherentes, aplicando una técnica de correlación del ruido (Gray *et al.*, 1998). En la Figura 7 se muestran imágenes 3D de la magnitud y velocidad de la capa de hielo Filchner Ice Shelf, Antártida, obtenida usando la técnica de correlación del ruido de base RADARSAT, recopiladas durante la misión de trazado de mapas de la Antártida del 19 de septiembre al 20 de octubre de 1997. En esta técnica de correlación del ruido se aprovecha el centelleo de muy fina resolución que figura en todas las imágenes radar y que permanece correlacionado en dos imágenes interferométricas coherentes. De este modo se logra una resolución de desplazamiento de 1/10 pixel en ambos sentidos a lo largo de la trayectoria y perpendicular. En el modo haz fino de RADARSAT, la resolución del desplazamiento es de aproximadamente 0.5 m en el sentido de azimut y de 2 m en alcance. Esta técnica puede ser combinada con la técnica de medición de fase de desplazamiento descrita anteriormente, a fin de mejorar la precisión.

Estas técnicas pueden ser utilizadas para medir no solamente efectos de terremotos sino también la subsidencia de pozos petrolíferos (Biegert *et al.*, 1998) y el movimiento de glaciares en el Ártico (Mattar *et al.*, 1998; Joughin *et al.*, 1998), y



**Figura 7.** Magnitud-3D y velocidad de la capa de hielo Filchner, Antártida, a partir de datos RADARSAT recopilados durante la misión de trazado de mapas de la Antártida del 19 de septiembre al 20 de octubre de 1997.

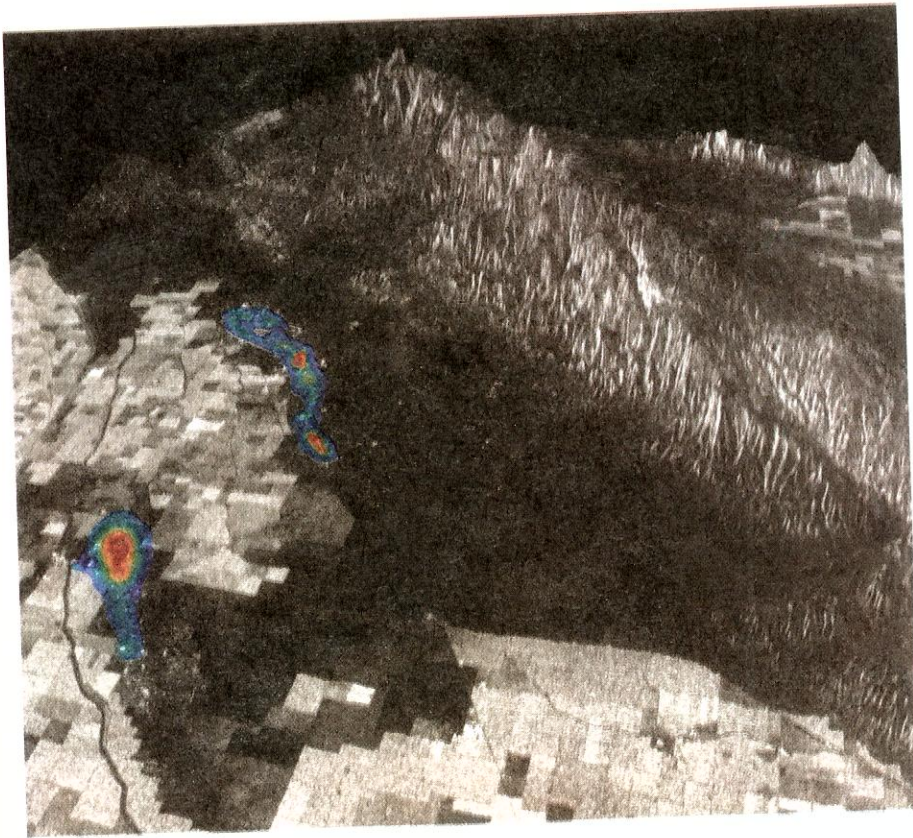
se está aplicando actualmente con datos de RADARSAT en la misión del trazado cartográfico de la Antártida para medir los movimientos del hielo (Gray *et al.*, 1998) y para analizar la dinámica del flujo de los glaciares (Forster *et al.*, 1998, Joughin *et al.*, 1999). En la Figura 8 se muestra una vista-3D de los campos petrolíferos Belridge en California con la zona de subsidencia en color (un máximo de 10 cm) durante 70 días en 1992. La subsidencia debida a la explotación petrolífera llevó a la rotura de una presa hidrográfica en California en los años 60, con pérdida de vidas y daños materiales de miles de millones de dólares. Los campos petrolíferos Belridge están situados cerca del acueducto de California y de la Falla de San Andrés. Se generaron MDE y mapas de deformación utilizando interferometría ERS-1, y también se utilizó una imagen de haz fino de RADARSAT para la imagen de radar superpuesta al MDE (cortesía, Atlantis Scientific).

### *Inhomogeneidades atmosféricas*

Varios efectos de propagación atmosférica pueden corromper la fase diferencial y producir errores en un producto interferométrico. Estos efectos han sido descritos por Goldstein (1995), Tarayre and Massonnet (1996), y Zebker *et al.*, (1997). La causa habitual son las variaciones en el contenido de vapor de agua atmosférico en la troposfera, lo que retarda la propagación y lleva a una variación adicional de fase. Por lo tanto, esta variación de fase corrompe la interpretación de la fase diferencial en términos de topografía o de movimiento de la superficie. Los efectos ionosféricos pueden también llevar a errores InSAR, aunque estos efectos son más probables cerca del Ecuador y en las regiones polares. Incluso los ensayos de trazado de mapas interferométricos en el alto Ártico en invierno han revelado modulaciones en un mapa de error de altura (una comparación de MDE derivados de InSAR a bordo y espacial) que parecían estar relacionadas con variaciones del vapor de agua atmosférico (Mattar *et al.*, 1999)

Existen varios métodos para reconocer estos efectos y para adoptar una estrategia para reducir al mínimo los errores en la generación de MDE y en la medición del desplazamiento. En el caso de generación de MDE, Ferretti *et al.* (1997) han demostrado que la combinación de interferogramas múltiples puede mejorar la calidad de un producto MDE, así como simplificar el desenvolvimiento de la fase. Trabajando con una línea de base de la mayor longitud posible (dentro de las restricciones impuestas por la línea de base crítica), se reducirá el componente de fase atmosférica asociado a la inhomogeneidad de propagación relativa al componente de fase topográfica, produciendo un error más pequeño en elevación. Se aplicó esta estrategia para demostrar las ventajas del InSAR en modo fino con RADARSAT en un entorno del Ártico seco en comparación con algunos pares de modos tandem ERS con líneas de base mucho más cortas (Mattar *et al.*, 1999).

Son más limitadas las opciones de reducir los efectos de propagación atmosférica en las mediciones de desplazamiento. Observando datos meteorológicos simultáneos es posible excluir las pasadas que incluyen nubes cumulonimbus o lluvia fuerte. A veces pueden reconocerse los efectos de propagación por la calidad de la



**Figura 8.** Vista 3D de campos petrolíferos Belridge en California, mostrando en color la subsidencia (un máximo de 10 cm) durante 70 días en 1992. La subsidencia debida a explotaciones petrolíferas causó la rotura de la presa hidroeléctrica de California en la década de los 60, con pérdida de vida y daños de miles de millones de dólares. Los campos petrolíferos Belridge están situados cerca del acueducto de California y de la Falla de San Andrés. El DEM y el mapa de deformación se generaron utilizando interferometría ERS-1 y una imagen de haz fino RADARSAT se utilizó para la imagen radar superpuesta al DEM (cortesía, Atlantis Scientific).

forma de onda que no se correlaciona espacialmente con fenómenos físicos conocidos. Es posible obtener más de una medición interferométrica del desplazamiento, y éstas pueden examinarse y promediarse para que disminuya el componente de fase atmosférica.

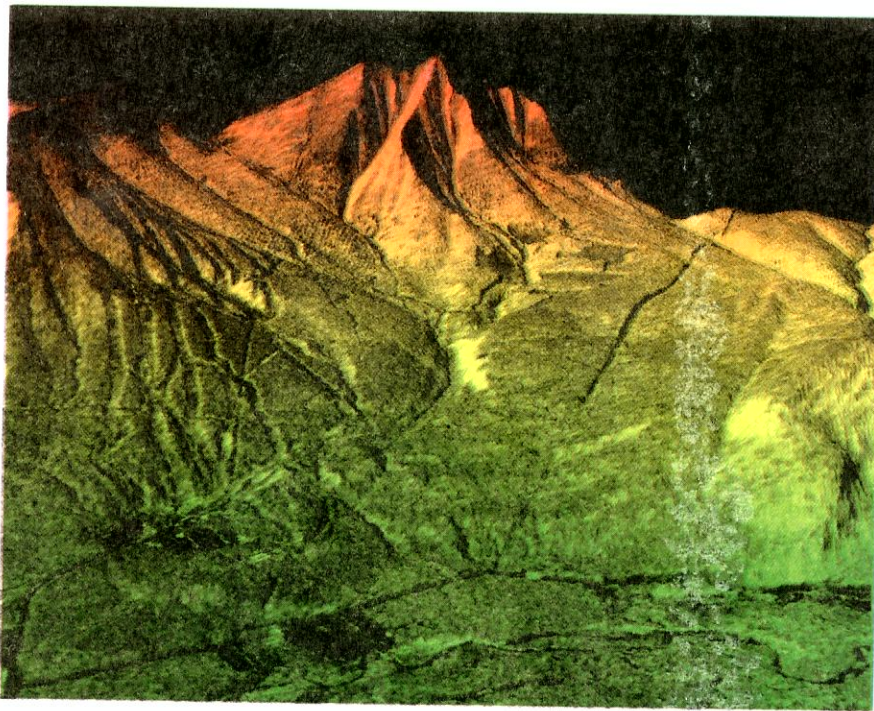
### *Interferometría con una sola pasada*

También pueden generarse datos interferométricos mediante una sola pasada, con sistemas de radar interferométricos de doble antena, tales como el sistema a bordo CV-580 del CCRS (Gray *et al.*, 1995) y el SRTM cuyo lanzamiento está programado para el año 2000. Estos radares están equipados de dos antenas separadas por una línea de base fija. La longitud de la línea de base, el ángulo que forma con la línea de alcance óptico y la longitud de onda del radar determinan la precisión del sistema en cuanto a elevación. Estos sistemas de antena doble tienen la ventaja de no estar influenciados por la mayoría de los errores de propagación atmosférica (puesto que ambas antenas están afectadas esencialmente del mismo modo, se cancelan los errores de propagación en el cálculo del interferograma), al no estar afectados por una falta de correlación temporal. Tienen la desventaja de que sus líneas de base son fijas y en el caso del sistema de a bordo tienen el inconveniente de que hay que compensar el movimiento complejo que requiere la plataforma de a bordo. En la Figura 9 se muestra una visión-3D de la región Kananaskis, Alberta, Canadá, obtenida con el modo de trazado de mapas interferométricos del radar CV-580 de Convair CCRS. Obsérvese la colina de esquí Nakiska, lugar de las pistas de esquí en los juegos olímpicos de 1988. La interferometría de a bordo con pasadas múltiples para medir el desplazamiento es también muy difícil puesto que requiere sistemas de navegación inercial extremadamente precisos y además es necesario compensar el movimiento.

### **Observaciones finales**

El modelo de elevación a partir de datos de satélites ha sido un tema de I&D en auge en los últimos treinta años, con el lanzamiento del primer satélite civil de teledetección. Pueden procesarse distintos tipos de datos (fotografías espaciales, lector VIR, SAR, altimetría) con distintos formatos (analógico, digital) y por distintos métodos (sombras/sombreado; estereoscopia, interferometría, polarimetría) aprovechando las distintas características de los sensores y de las imágenes (geometría, radiometría, fase) aplicando varios tipos de tecnologías (analógica, analítica, digital) y de procesamiento (interactivo, automático).

La mayoría de los métodos han sido propuestos y estudiados en los primeros años de la investigación. Sin embargo, la disponibilidad limitada de datos y de tecnologías correspondientes restringió su evolución en comparación con la fotogrametría tradicional. Además, su evolución respectiva es principalmente función del esfuerzo de investigación en términos de modelos de parámetros físicos y de procesamiento de datos.



**Figura 9.** Vista-3D de la región Kananaskis, Alberta, Canadá, obtenida con el modo de trazado de mapas interferométricos del radar CV-580 de Convair CCRS. Obsérvese la colina de esquí Nakiska, lugar de las pistas de esquí en los juegos olímpicos de 1988.



Entre estos métodos, la estereoscopia es el preferido y el que se utiliza más ampliamente para cartografía, fotogrametría y teledetección. Esto se debe en parte a que somos herederos de la estereofotogrametría ya bien desarrollada. Los últimos adelantos en la visión por computadora para modelar la visión humana han llevado al advenimiento de los nuevos enfoques automáticos de procesamiento de imágenes aplicados a la estereoscopia por satélite. Por ello ha sido posible automatizar aún más el proceso de levantamiento cartográfico, pero en ocasiones la realidad se ha quedado atrás de las previsiones.

La evolución de las diversas tecnologías de generación de MDE hace también eco de las actuales tendencias comerciales y científicas, y de la "moda". La estereoscopia SAR era muy popular en la década de 1980 con el desarrollo de ecuaciones radar-gramétricas y los primeros resultados interesantes y prometedores con el SIR-B. Sin embargo, el procesamiento de imágenes SAR y las correspondientes tecnologías para extraer los datos de elevación (tales como correlación de las imágenes), no estaban suficientemente maduros, lo que llevó a un declive temporal. En comparación con los datos VIR, la misma moda se aplicó también a los datos SPOT a la par de una extensa investigación por todo el mundo de los modelos paramétricos físicos y del procesamiento de imágenes, aprovechándose también la I&D en fotogrametría digital.

Cuando se lanzó el satélite ERS-1, los científicos se entusiasmaron por las técnicas interferométricas, utilizando modelos paramétricos anteriormente desarrollados. La mayoría de los esfuerzos de la investigación en los primeros años se concentró en el procesamiento de las imágenes (imagen de coherencia, desenvolvimiento de fase) y muy pocos en los artefactos físicos identificados y escasamente cuantificados (condiciones atmosféricas, calibración de sensores). Con el lanzamiento de RADARSAT en 1995, la radargrametría reavivó el interés de los científicos aprovechándose la I&D en correlación de imágenes lograda mediante SPOT a finales de la década de 1980 y con las nuevas tecnologías de computadoras.

Por último, es también obvio que la I&D el próximo milenio se concentrará en el uso de satélites SAR de alta resolución y en el desarrollo de las tecnologías correspondientes, tales como ENVISAT, RADARSAT-2 y SRTM (Werner, 1997).

Puesto que todos los sensores, sistemas, o métodos tienen sus propias ventajas e inconvenientes, en las soluciones por elaborar en el futuro para la generación operacional de MDE deberían utilizarse las características complementarias de los diversos sensores, métodos y procesamientos. Estas características complementarias de los sensores se han aplicado ya en la estereoscopia, combinando los datos VIR y SAR cuando el contenido radiométrico de la imagen VIR se combina con la elevada sensibilidad al relieve del terreno del SAR y con su capacidad "todo tiempo" para obtener la segunda imagen del par estéreo.

Las características complementarias de los métodos ya han sido investigadas con SAR cuando la estereoscopia se utilizaba para generar un MDE aproximado que ayudara a desenvolver la fase en interferometría, reduciendo las distorsiones de frecuencia baja y media en el interferograma. Las lagunas en el MDE provocadas por pérdida de coherencia en la interferometría y debidas a cambios temporales pueden también completarse con estereoscopia, dado que está menos influenciada por las diferencias radiométricas entre las dos imágenes.

También se aplican características complementarias a distintos niveles:

1. Utilizando dos pares estereoscópicos SAR de órbita ascendente y descendente para complementar parcialmente las pendientes negativas de cada par estéreo;
2. Utilizando dos pares interferométricos, uno con una corta línea de base (para ayudar al desenvolvimiento de fase), y otro con una línea de base más larga (para aumentar la precisión);
3. Utilizando la correlación visual de germinación de puntos con fines de correlación automática o para el procesamiento posterior y para la edición de los MDE en bruto (áreas de oclusión, de sombra o mal adaptadas); o
4. Utilizando mediciones estéreo de las características geomorfológicas (línea de máxima pendiente y líneas de cresta, superficies de lagos, etc.) para aumentar la uniformidad del trazado de mapas MDE.

Además, se ha demostrado en la mayoría de los experimentos anteriores que el usuario ha de hacer juicios y tomar decisiones en distintas etapas del procesamiento, sea cual fuere el nivel de procesamiento automático para obtener el producto MDE final. El "know-how" de los usuarios podría ser un complemento favorable de la capacidad de la computadora en las diversas etapas del procesamiento.

En el pasado, se han generado MDE de alta calidad con la fotogrametría tradicional por lo que se aplicaron a muchos fines. En la actualidad, se considera que los MDE son el mejor conjunto de datos permanentes y reutilizables en el transcurso del tiempo relacionados con la tierra. Aunque la necesidad, los requisitos y las especificaciones de los productos MDE no son fáciles de determinar debido a sus múltiples usos por parte de distintas comunidades de usuarios, se prevé generar MDE mundiales al año 2000, cuando el Laboratorio Radar Espacial EUA/Alemania se embarque en la misión de la nave espacial americana, el SRTM. Se utilizará interferometría en una sola pasada a dos frecuencias, con una segunda antena receptora para generar modelos MDE sobre toda la superficie de la Tierra comprendida entre las latitudes de  $-56^{\circ}$  y  $+60^{\circ}$  (Jordan *et al.*, 1995; Werner, 1997). La precisión del MDE obtenido que se genere mediante la interferometría de radar estadounidense en banda-C sería de una precisión del DTED ("Digital Terrain Elevation Data" en inglés) del orden de nivel-1. La precisión del MDE generado por la interferometría de radar alemana en banda-X será algo mejor, pero solamente con una cobertura parcial de las masas terrestres.

Por último, los científicos, los usuarios finales y los fabricantes de sistemas y sensores, etc., tendrán que responder en el futuro a varias preguntas. ¿No es el MDE mundial con una sola especificación una "apuesta arriesgada"? ¿Son de ayuda suficiente estas estadísticas de salida que describen el MDE mundial? ¿Podemos aceptar MDE que no puedan producir mapas con "curvas de nivel de buena apariencia"? ¿Estamos hoy día satisfechos con la producción de MDE a una escala particular y que quizá son meramente buenos para una determinada aplicación? ¿Se satisfarán los requisitos de todos los usuarios MDE? Los otros revendedores de datos de satélites no lo esperan así, puesto que al mismo tiempo (2000-2002) hay propuestas de

lanzamientos de organizaciones estadounidenses, canadienses, europeas, indias, rusas, japonesas, etc., privadas o gubernamentales de muchos nuevos satélites con imágenes VIR o SAR de alta resolución y con capacidad estéreo a lo largo de la trayectoria y en sentido perpendicular.

### Agradecimientos

Los autores desean dar las gracias a Ginette Frenette y Shannon Ross por su ayuda en la preparación del manuscrito y a Liyuan Wu por el procesamiento de las imágenes RADARSAT del Proyecto Multi-Andino. Se reconoce el valioso aporte del Dr. Bert Guindon quien ayudó a mejorar la calidad del material. Se desea también dar las gracias a Daniela Speme Marchinni de INREMI en Argentina y Robert St Jean de MIR Télédétection por la revisión del español. Por último, gracias a la *Revista Cartográfica* del IPGH por la oportunidad de promover el uso de radar, en particular RADARSAT, para aplicaciones de cartografía topográfica. Las imágenes RADARSAT del Proyecto Multiandino son cortesía del programa GlobeSAR-II.

### Bibliografía

- Biegert, E.K., J.L. Berry and S.D. Oakley (1998). "Subsidence monitoring using spaceborne interferometric SAR". *Proceedings of the Symposium RADARSAT ADRO*, CD-ROM, October 13-15.
- Boisvert, J.B., T.J. Pultz, R.J. Brown and B. Brisco (1999). "Potential of synthetic aperture radar for Grande-scale soil moisture monitoring: a review". *Canadian J. Remote Sensing*, vol. 22, no. 1, pp. 2-13, March.
- Buchroithner, M. (1989). "Stereo-viewing from Space". *Advances in Space Research*, vol. 19, no.1, pp. 29-40.
- Canadian Space Agency (1998). "Bringing Radar Application Down to Earth". *Proceedings of the RADARSAT ADRO Symposium*. Montreal, Canada. CD-ROM. October 13-15.
- Carlson, G.E. (1973). "An Improved Single Flight Technique for Radar Stereo". *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, vol. 11, pp. 199-204.
- Domik, G., F. Leberl and J. Cimino (1988). "Dependence of Image Grey Values on Topography in SIR-B Images". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, no. 5, pp. 1013-1022.
- (1983). "Evaluation of Radar Stereoviewability by Means of Simulation Techniques". *Proceeding IGARSS'84*. Paris, France. ESA-SP-215, pp. 623-646.
- Dowman, I.J., Z.G. Twu and P.H. Chen (1997). "DEM Generation from Stereoscopic SAR Data". *Proceedings of ISPRS Joint Workshop on Sensors and Mapping from Space*. Hannover, Germany, pp. 113-122. September 29-October 2.
- ESA-European Space Agency (1995). "New Views of the Earth: Scientific Achievements of ERS-1". *ESA SP1176/I Report*. Paris, France, 162 pages.

- Ferretti, A., C. Prati, F. Rocca and A.M. Guarnieri (1997). "Multi-baseline SAR interferometry for automatic DEM reconstruction". *Proceedings of the 3rd ERS Symposium*. Florence, Italy.
- Forster, R.R., K.C. Jezek, H. Gyoo Sohn, A.L. Gray and K.E. Mattar (1988). "Analysis of Glacier Flow Dynamics from Preliminary RADARSAT InSAR Data of the Antarctic Mapping Mission". *Proceedings of IGARSS'98*. Seattle, USA, pp. 2225-2227. July 6-10.
- Fullerton, J.K., F. Leberl and R.E. Marque (1986). "Lado opuesto SAR Image Processing for Stereo-viewing". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, no. 9, pp. 1487-1498.
- Gabriel, A.K., R. Goldstein and H. Zebker (1989). "Mapping Pequeña Elevation Changes Over Grande Areas: Differential Radar Interferometry". *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, no. B7, pp. 9183-9191.
- Gabriel, A.K. and R.M. Goldstein (1988). "Crossed-Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results from SIR-B". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, no. 5, pp. 857-872.
- Geudtner, D. and P. Vachon (1997). "RADARSAT Repeat-Pass SAR Interferometry: Results over an Arctic Test Site". *Proceedings of the GER'97 Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT*. Ottawa, Canada. CD-ROM. May 25-30.
- Goldstein, R. (1995). "Atmospheric Limitations to Repeat-Track Radar Interferometry". *Geophysical Research Letters*, vol. 22, pp. 2517-2520.
- Goldstein, R.M., H. Engelhardt, B. Kamb and R.M. Frolich (1993). "Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream". *Science*, vol. 262, pp. 1525-1530.
- Goldstein, R.M., H. Zebker and C. Werner (1988). "Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping". *Radio Science*, vol. 23, no. 4, pp. 713-720.
- Gracie, G., J.W. Bricker, R.K. Brewer and R.A. Johnson (1970). "Stereo Radar Analysis". *Fort Belvoir, VA, USA*. U.S. Engineering Topography Laboratory. Report FTR. pp. 1339-1345.
- Graham, L.C. (1974). "Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping". *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 6, pp. 763-768.
- Gray, A.L., K.E. Mattar, P.W. Vachon, R. Bindschadler, K.C. Jezek and R. Forster (1988). "InSAR Results from the RADARSAT Antarctic Mapping Mission Data: Estimation of Glacier Motion Using a Simple Registration Procedure". *Proceedings of IGARSS'98*. Seattle, USA, vol. III, pp. 1638-1640, July 6-10.
- Gray, A.L., K.E. Mattar and P.W. Vachon (1998). "RADARSAT interferometric SAR results obtained over Antarctic terrain". *Proc. CEOS Workshop*. ESA-ESTEC. pp. 67-69. Noordwijk, The Netherlands. Feb.
- Gray, A.L., K.E. Mattar and M.W.A. van der Kooij (1995). "Cross-track and Along-track Airborne Interferometric SAR at CCRS". *Proceedings of the Seventeenth Canadian Symposium on Remote Sensing*. Saskatoon. Saskatchewan.

- Hagberg, J.O., L.M.H. Ulander and J. Askne (1995). "Repeat-Pass Interferometry Over Forested Terrain". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 2, pp. 331-340.
- Jordan, R.L., B.L. Huneycutt and M. Werner (1995). "The SIR-C/X-SAR Synthetic Aperture Radar". *IEEE-Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 3, no. 4, pp. 829-839.
- Joughin, I.R., A.L. Gray, B. Bindschadler, S. Price, D. Morse, C. Hulbe, K. Mattar, C. Werner (1999). "Tributaries of West Antarctic ice streams revealed by Radarsat interferometry", accepted for publication in *Science*. July.
- Joughin, I.R., R. Kwok and M.A. Fahnestock (1998). "Interferometric estimation of three-dimensional ice-flow using ascending and descending passes". *IEEE Transactions Geoscience. Remote Sensing*, vol. 36, pp. 25-37, Jan.
- Kaupp, V., L. Bridges, M. Pisaruk, H. MacDonald and W. Waite (1983). "Simulation of Spaceborne Stereo Radar Imagery: Experimental Results". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 21, no. 2, pp. 400-405.
- Kobrick, M., F. Leberl and J. Raggam (1986). "Radar Stereo Mapping with Crossing Flight Lines", *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 12, no. 9, pp. 132-148.
- La Prade, G. (1970). "Subjective Considerations for Stereo Radar". Proceedings of the Thirty-sixth Annual Meeting of the American Society of Photogrammetry. Washington, D.C., USA, pp. 640-651, March 1-6.
- (1963). "An Analytical and Experimental Study of Stereo for Radar". *Photogrammetric Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 294-300.
- Leberl, F., K. Maurice, J.K. Thomas and M. Millot (1994). "Automated Radar Image Matching Experiment". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 49, no. 3, pp. 19-33.
- Leberl, F. (1990). "Radargrammetric Image Processing". Artech House. Norwood. USA, 595 pages.
- Leberl, F., G. Domik, J. Raggam and M. Kobrick (1986a). "Radar Stereo-mapping Techniques and Applications to SIR-B Images of Mount Shasta". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 24, no. 4, pp. 473-481.
- Leberl, F., G. Domik, J. Raggam, J. Cimino and M. Kobrick (1986b). "Multiple Incidence Angle SIR-B Experiment Over Argentina: Stereo-Radargrammetric Analysis". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 24, no. 4, pp. 482-491.
- Leberl, F. (1979). "Accuracy Analysis of Stereo Side Looking Radar". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 45, no. 8, pp. 1083-1096.
- , (1976). "Imaging Radar Applications to Mapping and Charting". *Photogrammetria*, vol. 32, no. 3, pp. 75-100.
- Li, F. and R.M. Goldstein (1990). "Studies of Multi-Baseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 1, pp. 88-97.

- Lizeca, J.L., W.M. Moon, C. Hutton, L. Wu and C.W. Lee (1999). "Investigation of Pastos Grandes (Bolivia) Volcanic Features with RADARSAT". *Proceedings of IGARSS'99*. Hamburg, Germany. CD-ROM. June 28-July 2.
- Maître, H., F. Turpin et J.M. Nicolas (1997). "Cartographie automatique radar: l'apport du traitement d'images", *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 148, pp. 6-14.
- Manual of Remote Sensing* (1998). Third Edition. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Falls Church. Va., USA.
- Marinelli, L., Th. Toutin et I. Downan (1997). "Génération de MNT par radargrammetrie: état de l'art et perspectives". *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 148, pp. 88-96.
- Marr, D. (1982). "Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information". W.H. Freeman and Co., San Francisco, California. USA.
- Marr, D. and E. Hildreth (1980). "Theory of Edge Detection". *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. B207, pp. 187-217.
- Marr, D. and T. Poggio (1977). "A Computation of Stereo Disparity". *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. B194, pp. 283-287.
- Massmann, F.H., Ch. Reigber, R. König, J.C. Raimondo, C. Rajasenanv (1993). "ERS-1 orbit information provided by D-PAF". *Proceedings. 2nd ERS-1 Symposium-Space at the Service of our Environment*. Hamburg, Germany. ESA SP-361, pp. 765-770. October 11-14.
- Massonnet, D. (2000). "Elevation Modelling and Displacement Mapping Using Radar Interferometry" to appear in Chapter of Encyclopedia of Analytical Chemistry: Instrumentation and Applications. John Wiley and Sons. Chichester, UK.
- Massonnet, D. and K.L. Feigl (1998). "Radar Interferometry and its Application to Changes in the Earth's Surface". *Reviews of Geophysics*, vol. 36, no. 4, pp. 441-500.
- (1995). "Discrimination of Geophysical Phenomena in Satellite Interferograms". *Geophysical Research Letters*. vol. 22, pp. 1537-1540.
- Massonnet, F.H. and T. Rabaute (1993). "Radar Interferometry: Limits and Potential". *IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing*. vol. 31, no. 2, March.
- Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragana, G. Peltzer, K. Feigl and T. Rabaute (1993). "The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry". *Nature*, vol. 364, pp. 138-142.
- Mattar, K.E., A.L. Gray, D. Geudtner, P.W. Vachon (1999). "Interferometry for DEM and Terrain Displacement: Effects of Inhomogeneous Propagation". *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 25, no. 1, pp. 60-69, March.
- Mattar, K.E., Vachon, D. Geudtner, A.L. Gray, I. Cumming, M. Brugman (1998). "Validation of ERS Tandem Mission SAR Measurements of Alpine Glacier Velocity". *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 3, pp. 974-984, May.

- Paillou, Ph. and M. Gelautz (1998). "The Optimal Gradient Matching Method: Application to X-SAR and Magellan Stereo-Images". IGARSS'98. Seattle, Washington, USA, pp. 2357-2359, 6-10 July.
- Parashar, S., E. Langham, J. McNally and S. Ahmed (1993). "RADARSAT Mission Requirements and Concepts". *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no. 4, pp. 280-288.
- PCI Enterprises, Inc. (1998). "OrthoEngineRE and OrthoEngineRE 3D". Reference Manual. Richmond Hill. Ont., Canada. Version 6.2. March.
- Pequeña, D., C. Werner and D. Nuesch (1995). "Geocoding of ERS-1 INSAR-derived Digital Elevation Models". *EARSel Journal Advances in Remote Sensing*, vol. 4, no. 2, Oct.
- Polidori, L. et Th. Toutin (1998). "Cartographie du relief par imagerie radar: l'état de l'art". *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 152, pp. 12-23.
- Polidori, L. (1996). "Cartographie radar". *Gordon and Breach Science Publishers*. Amsterdam. The Netherlands. 287 pages.
- (1991). "Digital Terrain Models from Radar Images: a Review". *Proceedings of the International Symposium on Radars and Lidars in Earth and Planetary Sciences*. ESA SP-328. Cannes, France, pp. 141-146. September 2-4.
- Raggam J. and A. Almer (1996). "Assessment of the Potential of JERS-1 for Relief Mapping Using Optical and SAR Data". *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vienna, Austria, vol. 31, no. B4, pp. 671-676.
- Raggam, J., A. Almer, W. Hummelbrunner and D. Strobl (1993). "Investigation of the Stereoscopic Potential of ERS-1 SAR Data". *Proceedings of the Fourth International Workshop on Image Rectification of Spaceborne Synthetic Aperture Radar*. Loipesdorf, Austria, pp. 81-87, May 26-28.
- Raggam, J. and A. Almer (1991). "A Multi-Sensor Stereo-Mapping Experiment". *Proceedings of the ACSM/ASPRS/Auto Carto Annual Convention Baltimore*. MD, vol. 4, pp. 173-182.
- Raggam, J. and F. Leberl (1984). "SMART- a Program for Radar Stereo Mapping on the Kern DSR-1". *Proceedings of the ASPRS Annual Convention*, pp. 765-773.
- Ramapriyan H., J. Strong, Y. Hung and C. Murray (1986). "Automated Matching Pairs of SIR-B Images for Elevation Mapping". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 24, no. 4, pp. 462-472.
- Rodgers, A.E.E., and R.P. Ingalls (1969). "Venus Mapping: The Surface Reflectivity by Radar Interferometry". *Sciences*, vol. 165, pp. 797-799.
- Rosenfield, G.H. (1968). "Stereo Radar Techniques". *Photogrammetric Engineering*. vol. 34, pp. 586-594.
- Simard R., F. Plourde and Th. Toutin (1986). "Digital Elevation Modelling with Stereo SIR-B Image Data". *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management*. ISPRS Commission VII. Enschede. The Netherlands, pp. 161-166.

- Sylvander, S., D. Cousson et P. Gigord (1997). "Étude des performances géométriques des images RADARSAT". *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 148, pp. 57-65.
- Tarayre, H.D., and D. Massonnet (1996). "Atmospheric propagation heterogeneities revealed by ERS-1 interferometry". *Geophysical Research Letters*, vol. 23, pp. 989-992.
- Thomas, J. and W. Kober (1990). "Radarclinometry-Shape from Shading: Generalized N-Image Algorithm". Sections 15.4 to 15.7 of "Radargrammetric Image Processing" by F. Leberl. Artech House. Norwood, USA, pp. 435-551.
- Toutin, Th. (2000a). "Elevation Modelling from Satellite Data" to appear in Chapter of Encyclopedia of Analytical Chemistry: Instrumentation and Applications". John Wiley and Sons. Chichester, UK. 27 pages.
- (2000b), "Evaluation of Radargrammetric DEM from RADARSAT Images in High Relief Areas". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 2, 7 pp.
- (2000c). "Stereo-Mapping with SPOT-P and ERS-1 SAR Images". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, no. 1, 15 pp.
- (1999) "Error Tracking of Radargrammetric DEM from RADARSAT Images". *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, pp. 2227-2238.
- Toutin, Th. and C. Vester (1999). "Remote Sensing Tutorial: Radar and Stereoscapy". Canada Centre for Remote Sensing web, <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/rsradar/indexe.html>.
- Toutin, Th. and S. Amaral (1999). "Stereo RADARSAT Data for Canopy Height in Brazilian Forests". *Canadian Journal for Remote Sensing*, vol. 25, no. 4 (in press).
- Toutin, Th. (1998). "Evaluation de la précision géométrique des images de RADARSAT". *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 24, no.1, pp. 80-88.
- (1996). "Opposite-side ERS-1 SAR Stereo Mapping Over Rolling Topography". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 2, pp. 543-549.
- (1995). "Generating DEM from Stereo Images with a Photogrammetric Approach: Example with VIR and SAR Data". *EARSeL Journal Advances in Remote Sensing*, vol. 4, no. 2, pp. 110-117.
- Twu, Z.G. and I. Dowman (1996). "Automatic Height Extraction from ERS-1 SAR Imagery". *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 31, no. B2, pp. 380-383.
- Usai, S. and R. Klees (1998). "On the applicability of the INSAR technique on long time scales". 2nd International Workshop on Retrieval of Biodiversity & Geo-Phy. Param. from SAR data for Land App., Estec, The Netherlands. Oct. 21-23.
- Vachon, P., D. Geudtner, L. Gray and R. Touzi (1995). "ERS-1 Synthetic Aperture Radar Repeat-Pass Interferometry Studies: Implications for RADARSAT". *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 21, no. 4, pp. 441-454.



- Wegmüller, U., C.L. Werner, D. Nüesch and M. Borgeaud (1995). "Land-surface analysis using ERS-1 SAR interferometry". *ESA Bulletin*, vol. 81, pp. 30-37.
- Wegmüller, U. and Ch. Werner (1995). "SAR Interferometric Signature of Forest". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 2, pp. 1153-1161.
- Werner, M. (1997). "Shuttle Radar Topography Mission". *Proceedings of ISPRS Workshop: Sensors and Mapping from Space*. Hannover, Germany, pp. 9-11, Sept. 29-Oct. 2.
- Yelizavetin, I.V. and Ye. A. Ksenofontov (1996). "Precision Terrain Measurement by SAR Interferometry". *Mapping Science sand Remote Sensing*, vol. 33, no. 1, pp. 1-19.
- Yelizavetin, I.V. (1993). "Digital Terrain Modeling from Radar Image Stereopairs". *Mapping Science sand Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 151-160.
- Yoritomo, K. (1972). "Methods and Instruments for the Restitution of Radar Pictures". *Invited Paper at the Twelfth Congress of the International Society for Photogrammetry*. Ottawa, Canada. July 24-August 4.
- Zebker, H.A., P.A. Rosen and S. Hensley (1997). "Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps". *Journal Geophysical Research*, vol. 102, pp. 7547-7563.
- Zebker, H.A., C. Werner, P.A. Rosen and S. Hensley (1994). "Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 4, pp. 823-836.
- Zebker, H.A., P.A. Rosen, R.M. Goldstein, A. Gabriel and C.L. Werner (1994). "On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake". *Journal Geophysical Research*, vol. 99, no. B10, pp. 19617-19634.