

PRODUCCIÓN DE MDA A PARTIR DE RADARSAT: PANORAMA Y EJEMPLOS*

Th. Toutin¹, K. Mattar², B. Brisco³, L. Gray¹, y M. Manore¹

¹Natural Resources Canada, CCRS ²Intermap Technologies ³Noetix Research Inc.
588 Booth Street, 2-200 Gurdwara Road, 265 Carling Avenue,
Ottawa, Canada K1A 0Y7 Nepean, Canada K2E 1A2 Ottawa, Canada K1S 2E1

Email: thierry.toutin@ccrs.nrcan.gc.ca

RESUMEN

El lanzamiento reciente de sistemas civiles de radar, tales como ERS y RADARSAT, ha llevado al rápido desarrollo de técnicas para extraer información sobre alturas a partir de los datos del radar de apertura sintética. Los datos RADARSAT son muy convenientes para esta tarea por la capacidad de los sensores de observar en estéreo y procesar a base de 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, entornos montañosos y regiones áridas. En esta nota se presentan las líneas generales y algunos ejemplos de métodos estereoscópicos e interferométricos para trazado de mapas con elevación y desplazamientos sirviéndose de los datos RADARSAT.

1.0 INTRODUCCIÓN

La teledetección ha evolucionado para convertirse en un importante suplemento de las observaciones de tierra 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 parte del espectro invisible para el ojo humano e incluso para las cámaras fotográficas se ha ampliado grandemente 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 hidráulicas, materiales de superficie y crecimiento de la vegetación.

Un modelo digital de altura (MDA), que constituye una representación digital del relieve de la tierra, es en la actualidad una de las más importantes estructuras de datos aplicadas al análisis

* Publicado en *Revisa Cartografica*, Instituto Panamericano de Geografía y Historia, 71:135-174, 2000.

geoespacial. Desafortunadamente, todavía no se dispone para gran parte de la tierra de MDA con detalles útiles y allí donde existen no siempre son de suficiente precisión. Puesto que el formato digital del MDA hace que el intérprete pueda obtener fácilmente la información subsiguiente 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 los recientes sistemas radar por satélite (SIR, Almaz, ERS, JERS, RADARSAT, etc.) un gran número de investigadores de todo el mundo está trabajando en el desarrollo de modelos de elevación y en la producción de MDA. En estos 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 natural humana de la profundidad, ha sido desde hace tiempo un método popular para observar e interpretar las imágenes obtenidas por teledetección. Básicamente, se utilizan imágenes superpuestas que se obtienen a partir de dos puntos de vista distintos sobre la misma extensión de terreno a fin de calcular la elevación a partir de la paralaje obtenida entre los puntos correspondientes de las dos imágenes (Figura 1).

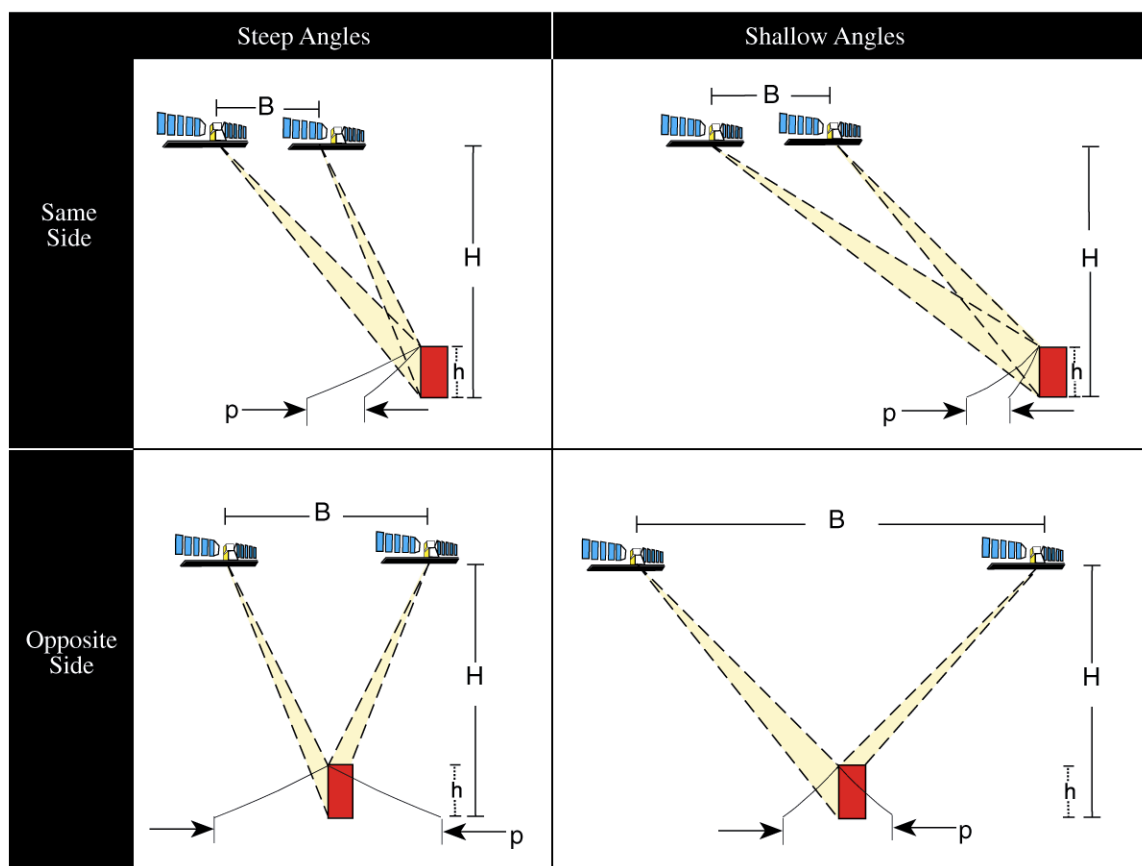


Figura 1: Diversas configuraciones de pares estéreo RADARSAT-SAR (el mismo lado y lado opuesto; ángulos de observación pronunciados y superficiales).

La interferometría radar es un método de alternativa del estereoscópico tradicional para extraer la información sobre elevación, 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 distintos. 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 notas de estudio describiendo 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 pero no en general todos los de la construcción de modelos de elevación a partir de datos SAR de satélites. Puede consultarse una reseña completa y actualizada en Toutin (2000) de tipo general y en Massonnet (2000) concretamente respecto a interferometría.

El objetivo de esta nota de estudio no es presentar una idea general sino solamente un panorama del trazado de mapas MDA a base 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 proporcionan 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 RADARSAT y productos para trazado de mapas MDA mediante métodos de estereoscopia e interferometría.

2.0 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 radar pero los efectos psicológicos (p.ej., sombreado y sombras) influyen de forma intensa y acumulada en la formación de imágenes estéreo o radar. Por ejemplo, sobre un terreno casi llano los efectos de sombreado y sombras superan la disparidad binocular al examinar un par radar en estéreo 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 concretos de geometría 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 radar pueden verse en estéreo a medida que se adquiere experiencia con la facilidad con la que se observan las imágenes por satélite, visibles e infrarrojo (VIR) (Toutin and Vester, 1999).

2.1 Aplicación a los sensores SAR y a RADARSAT

En el decenio de 1960, se aplicaron por primera vez métodos estereoscópicos a las imágenes

radar para obtener la elevación del terreno lo que llevó al desarrollo de la radargrametría (La Prade, 1963). Este demostró que algunas configuraciones estéreo SAR concretas producirán las mismas paralajes de elevación que las producidas por aerofotografías. Por consiguiente, podría obtenerse la elevación en los trazadores estéreo tradicionales. Estos pueden ser seguidamente utilizados para medir la elevación de los blancos. Más tarde, Carlson (1973) elaboró una técnica de trayecto único para generar imágenes radar en estéreo con la que era más fácil observar y medir la paralaje para el cálculo de la elevación que la técnica tradicional de doble trayecto. Sin embargo, la ausencia de pares-estéreo 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 el decenio de 1980, las mejoras de los sistemas SAR y a la par investigaciones sobre la teoría, permitieron demostrar las capacidades de radar estéreo 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 estéreo de lado opuesto es superior a la configuración estéreo del mismo lado. En la Figura 1 se ilustra esta superioridad mostrando la geometría de intersección con la paralaje radar debida a la elevación en distintas configuraciones estéreo (el mismo lado por comparación con lado opuesto; ángulos de observación pronunciados por comparación con ángulos de observación superficiales). Las limitaciones en el uso de estas configuraciones geoméricamente superiores proceden de las diferencias de iluminación que son demasiado pronunciadas para ser observadas en estéreo y a la dificultad de encontrar los puntos y características correspondientes.

Para obtener una buena geometría que mejore el trazado estéreo, el ángulo de intersección (Figura 1) debe ser lo suficientemente grande para que aumente el factor de exageración estéreo o de modo equivalente la paralaje observada, que se utiliza para determinar la elevación del terreno. Inversamente, para tener una buena visión estéreo, los interpretadores (o la adaptación de imágenes) prefieren un par estéreo que sea en lo posible casi idéntico, lo cual implica un ángulo pequeño de intersección. Por consiguiente, las grandes disparidades geométricas y radiométricas impiden ambas la visión estéreo y el trazado estéreo preciso. Puesto que la disminución de una disparidad pudiera compensar la otra disparidad, se ha llegado a un compromiso entre una mejor visión estéreo (pequeñas diferencias radiométricas y una geometría y trazado más fuertes (paralaje grande).

El compromiso común para cualquier clase de relieve es utilizar un par estéreo del mismo lado con el que se reducen ambas disparidades. Desafortunadamente, de esta forma no se eleva al máximo el potencial pleno del radar estéreo para cualquier topografía. Para que disminuya la diferencia radiométrica de un par estéreo de 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 MDA disperso, lo cual se ha aplicado con éxito para la adaptación iterativa jerárquica de las imágenes SAR (Simard *et al.*, 1986). Otro posible compromiso consiste en utilizar un par estéreo de lado opuesto por encima de una topografía ondulante (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 estéreo

y un buen trazado estéreo.

Con las plataformas espaciales, son muy raros los vuelos en paralelo (desde el lado opuesto o del mismo lado), incluso las órbitas de satélites heliosíncronas son solamente paralelas cerca del Ecuador. En otras partes, deben considerarse líneas de vuelo cruzadas o una configuración estéreo 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 naveta 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 radar en un trazador-estéreo analítico, Kern DSR-1, que se adaptó para procesar imágenes SAR estéreo (Raggam and Leberl, 1984). En el último estudio se empleó un método plenamente digital con adaptación jerárquica iterativa. Los resultados logrados para el MDA fueron del orden de 60 m a 100 m debido principalmente a la escasa resolución del SIR-A, o a la calidad de las imágenes radiométricas y geométricas. 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 desde principios del decenio de 1990 de muchos diversos sensores SAR por satélite (Almaz, ERS, JERS, etc.) la radargrametría se convirtió una vez más en un tema de I&D candente. En primer lugar, el sistema ruso Almaz-1 con SAR captó imágenes estéreo a 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, EUA. 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 de modo de balanceo-inclinación (35°) para generar un par-estéreo del mismo lado (Raggam *et al.*, 1993; Twu and Dowman, 1996). Esto también puede obtenerse con dos imágenes a ángulo de observación normal (23°) desde órbitas ascendentes y descendentes que generan un par-estéreo de lado opuesto (Toutin, 1996). La comparación de estos resultados de la investigación confirmó la superioridad del par estéreo de lado opuesto: 20 m por 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). Se utilizó subsiguientemente un método de correlación digital para generar un MDA con una precisión de 75 m.

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 son aproximadamente de 40° - 45°;
2. Domik (1984) demostró que las mejores impresiones estéreo subjetivas se obtenían con ángulos de observación superficiales (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 superior resolución en tierra 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 notificados son contradictorios y los experimentos prácticos no prestan claramente apoyo a las previsiones teóricas: por ejemplo, los mayores ángulos de intersección y una mayor resolución espacial no se traducen en mayor precisión. En varios experimentos, las tendencias en cuanto a la posición van incluso en sentido inverso especialmente en caso de topografía accidentada. Solamente en el caso extremo de relieve bajo, la precisión se acerca a las previsiones teóricas.

Por analogía con la fotogrametría, los análisis teóricos de errores se desarrollaron por primera vez por Rosenfield (1968) y La Prade (1970). Ellos relacionan un error de un elemento exterior de orientación en las imágenes izquierda y derecha con el error resultante del modelo estéreo. Estos primeros análisis se limitaron principalmente a errores absolutos y por comparación de estéreo del mismo lado con estéreo de lado opuesto. Leberl (1979) utilizó un enfoque más general para la propagación del error, señalando los errores relativos y absolutos de cualquier configuración estéreo. En resumen, una estimación del error en las coordenadas transversales a la derrota 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 estéreo viene dada por:

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

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

Siendo θ_L y θ_R los ángulos de observación de las imágenes izquierda y derecha respectivamente, y $\Delta\theta$ 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 atiende solamente a los aspectos geométricos del SAR (ángulos de observación y de intersección, error de alcance) y hace completamente caso omiso de los aspectos radiométricos (retrodispersión SAR) del par estéreo y del relieve. Por lo tanto, este modelo de propagación de error solamente puede ser aplicado cuando la radiometría desempeña una función de menor importancia y repercute menos en la geometría tal como durante el establecimiento del modelo estéreo con puntos terrestre de referencia (GCP en inglés), que son blancos radiométricamente bien definidos (Sylvander *et al.*, 1997; Toutin, 1998). Los errores residuales del ajuste de media cuadrática del modelo estéreo están por lo tanto 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 las imágenes estéreo apropiadas para generación MDA. Por consiguiente, debe intentarse extrapolar con precaución los conceptos estéreo VIR al SAR.

2.2 Procesamiento, métodos y errores

Las distintas etapas de procesamiento para producir MDA utilizando imágenes estéreo pueden describirse en términos generales de la forma siguiente:

1. captar los datos de la imagen en estéreo con información suplementaria tal como de efemérides;
2. recopilar los GCP para calcular o definir con mayor precisión la geometría del modelo estéreo;
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 MDA (adaptación, filtrado, edición en 3-D etc.).

2.2.1 Adquisición de datos de imágenes-estéreo

Las imágenes SAR son productos estándar en presentaciones de alcance inclinada 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 de la alcance terrestre es el producto más popular puesto que el espaciado de pixel en tierra es aproximadamente el mismo para las imágenes con distintos ángulos de observación. Se facilita seguidamente la visión y la adaptación estéreo. La solución de modelo paramétrico para calcular el modelo estéreo y la intersección en 3D se inicia generalmente a partir de las ecuaciones Doppler y de distancia tradicionales (Twu and Dowman, 1996; Sylvander *et al.*, 1997), a partir de ecuaciones de radargrametría (Leberl, 1990), o a partir de ecuaciones generalizadas (Toutin, 1995). Sus desarrollos matemáticos son distintos y dependen también del método aplicado (estación de trabajo-estéreo analítica o digital, imagen digital o adaptación visual, etc.).

2.2.2 Recopilación de los puntos terrestre de referencia (GCP)

Sea cual fuere el modelo geométrico SAR utilizado para el modelo estéreo y para la intersección en 3D, algunos GCP han de adquirirse para perfeccionar el modelo estéreo 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 requiere una dispersión de muchos GCP (20 y más) por todo el par estéreo completo. Cada modelo de imágenes se calcula por lo tanto 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 con la última generación de satélites tales como RADARSAT.

Con el modelo paramétrico tal como los 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 al borde del par estéreo 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 estéreo y llenar las lagunas donde no existan GCP con XYZ. Además, los GCP presentados solamente en una imagen dentro o fuera del par estéreo pueden también captarse como puntos complementarios a los GCP “estéreo”. Combinados con los puntos de unión pueden también ayudar a evitar la extrapolación en planimetría en zonas en las que no hay GCP “estéreo”.

La precisión final de la geometría estéreo depende principalmente de las coordenadas cartográficas y de la imagen de los GCP. Las primeras pueden obtenerse a partir del GPS, de levantamientos aerofotográficos, de digitalización de mapas, etc. Se trazan las coordenadas de las imágenes interactivamente en el trazador o en la pantalla. Puesto que algunas estaciones de trabajo no tienen funciones estereoscópicas completas, las coordenadas de las imágenes se obtienen simultáneamente en “monoscopio doble”. Este trazado creará entonces paralajes X- e Y- (pocos píxeles) entre las imágenes y los errores de paralaje se propagaran por el modelo estéreo (orientaciones relativas y absolutas), la intersección-estéreo y por último el MDA. La propagación del error puede ser grande con un par-estéreo SAR, cuando la precisión del trazado es aproximadamente de 1-2 píxeles. Debido a la geometría del mismo lado con ángulos pequeños de intersección (8° a 20°) de los pares-estéreo SAR, esta propagación del error debido al trazado “monoscópico doble” aumenta con ángulos de observación superficial y con ángulos más pequeños de intersección (Toutin, 1998). Por lo tanto, la precisión MDA puede disminuir a razón del 20% al 40%, dependiendo de la geometría del par-estéreo (Toutin, 1999a). El trazado estereoscópico verdadero utilizando la percepción humana de la profundidad permite una mejor correspondencia relativa de los GCP entre 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.

2.2.3 Extracción de la paralaje de elevación

Para extraer la paralaje de elevación mediante la adaptación 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 adaptación visual por computadora es una ampliación del método fotogramétrico tradicional para extraer datos de elevación (líneas de nivel) en un trazador-estéreo. Esto requiere tener todas las capacidades estereoscópicas para generar la reconstrucción tridimensional en línea del modelo estéreo y para la captura en tiempo real de las características planimétricas en 3-D y de elevación. Para la elevación, pueden generarse líneas de nivel o un MDA de retícula 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, radiométricamente o temporalmente. Se logra la separación espacial mediante el uso de dos dispositivos 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 anaglíficas 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 actuación real en 3-D en una estación de trabajo-estéreo se obtienen repetidamente muestras de las imágenes en una geometría equipolar o cuasi equipolar 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 el trazador estéreo 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 adaptación 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 adaptación visual por computadora (Raggam *et al.*, 1984; Toutin, 1995) es un proceso largo y de alto precio para obtener un MDA. Cuando se emplean imágenes digitales la adaptación automatizada de la imagen puede por lo tanto ser utilizada. Puesto que la adaptación de imágenes ha sido un tema candente de investigación en los últimos veinte años, existe acerca del tema una gran riqueza de trabajos de investigación y de bibliografía.

La mayoría de los estudios de investigación sobre adaptación 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 adaptación de imágenes basada en estas suposiciones es una adaptación de imagen de nivel gris. La adaptación de nivel gris entre dos imágenes implica realmente que los datos de intensidad radiométrica de una imagen representando un elemento particular del mundo real deben cotejarse con los datos de intensidad de la segunda imagen que representa al mismo elemento del mundo real.

Aunque las imágenes por satélite del mundo real representadas por niveles de gris no son como un estereograma de puntos aleatorios (de adaptación fácil), la adaptación de nivel gris ha sido ampliamente estudiada y en parte aplicada a los datos SAR. La mayoría de los sistemas de adaptación funciona por referencia y con ventanas de búsqueda. Para cada posición en la ventana de búsqueda se calcula un valor de adaptación a partir de los valores de nivel gris en la ventana de referencia. El máximo local de todos los valores de adaptación calculados en la ventana de búsqueda es la posición espacial del punto buscado. Puede calcularse el valor de adaptación 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 adaptación eran más pequeños con imágenes SPOT y fotografías aéreas digitalizadas que con imágenes SAR. Los dos últimos métodos han sido pocas veces o nunca utilizados por la comunidad de teledetección para calcular el valor de adaptación.

Puesto que una de las limitaciones consistía en perder o aplicar incorrectamente la adaptación de nivel gris, Marr elaboró una segunda generación de adaptación de imágenes: adaptación a base de características (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 adaptación basada en características no ha sido muy popular con las imágenes SAR porque el lugar de los bordes en terreno montañoso puede migrar de una imagen a otra.

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

Aunque la adaptación visual por computadora es un proceso largo ha demostrado ser más precisa con los datos SAR (Leberl *et al.*, 1994; Toutin, 1999a, b). Por lo tanto, puede ser utilizada ya sea para eliminar errores crasos o como complemento de adaptación falsa en áreas en las que esta adaptación 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 adaptación de imágenes automáticas.

2.3 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 MDA y para seguir la pista a la propagación del error. El RADARSAT, con sus diversos modos operativos, puede proporcionar una riqueza de imágenes desde 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) (Desarrollo de aplicaciones y oportunidades de investigación) patrocinado por la Agencia Espacial Canadiense (CSA), investigadores han emprendido por todo el mundo estudios amplios 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 por extracción de MDA: 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 (trazador estéreo digital o correlación de imágenes). Puede también atenderse a la extracción relativa 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 MDA y el ángulo de intersección o la relación de paralaje vertical (RPV) (Toutin, 1999a). De hecho, la mayoría de los resultados han demostrado que el parámetro principal que tiene un impacto significativo en la precisión del MDA 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 por comparación con S4-S7), y no mejora significativamente la precisión MDA. Además, aunque el centelleo crea alguna confusión en el trazado estéreo, no degrada la precisión MDA 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 de centelleo adaptable no mejora la precisión MDA (Dowman *et al.*, 1997); sin embargo, reduce ligeramente el contraste de la imagen y suaviza el relieve (especialmente el relieve bajo) (Toutin, 1999a).

Un ejemplo de uso de RADARSAT para la extracción de MDA se muestra en la Figura 2-5 del proyecto Multi-Andino de Bolivia (Lizca *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 MDA de extracción estéreo mediante correlación automática con la superposición de líneas de nivel a 100-m. El MDA ha sido generado utilizando el método elaborado en CCRS (Toutin, 1995) y llevado al soporte lógico OrthoEngine^{SE} de PCI (PCI Enterprises Inc., 1998). En las Figuras 4 y 5 se proporcionan ejemplos de productos de valor añadido tales como la imagen cromostereoscópica 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 ortorectificada S6 de RADARSAT y del MDA extraído en estéreo.

Puesto que no se disponía de datos verdaderos de terreno del proyecto Multi-Andino para verificar la precisión del MDA, se proporciona en la Tabla 1 un resumen de los resultados de precisión obtenidos mediante diez imágenes estéreo RADARSAT sobre un emplazamiento canadiense para estudio de la topografía ondulante. Se generaron los MDA con los mismos método, etapas de procesamiento y soporte lógico, pero en un entorno de IyD mejor controlado (Toutin, 1999a). Además de la totalidad de los MDA 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 máximo y mínimo en metros para relieve bajo y moderado. Los dos últimos pares son los mismos de lado opuesto configuration (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 máximas diferencias de paralaje y radiométrica).

Las diferencias radiométricas debidas al emplazamiento de estudio con relieve moderado son uno de los factores que repercuten en la adaptación automática de imágenes para calcular el coeficiente de correlación máxima, particularmente para pares estéreo con grandes ángulos de intersección (p. ej., S1-S7). Por encima de terreno escarpado esto se destaca 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 captación 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 de 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.

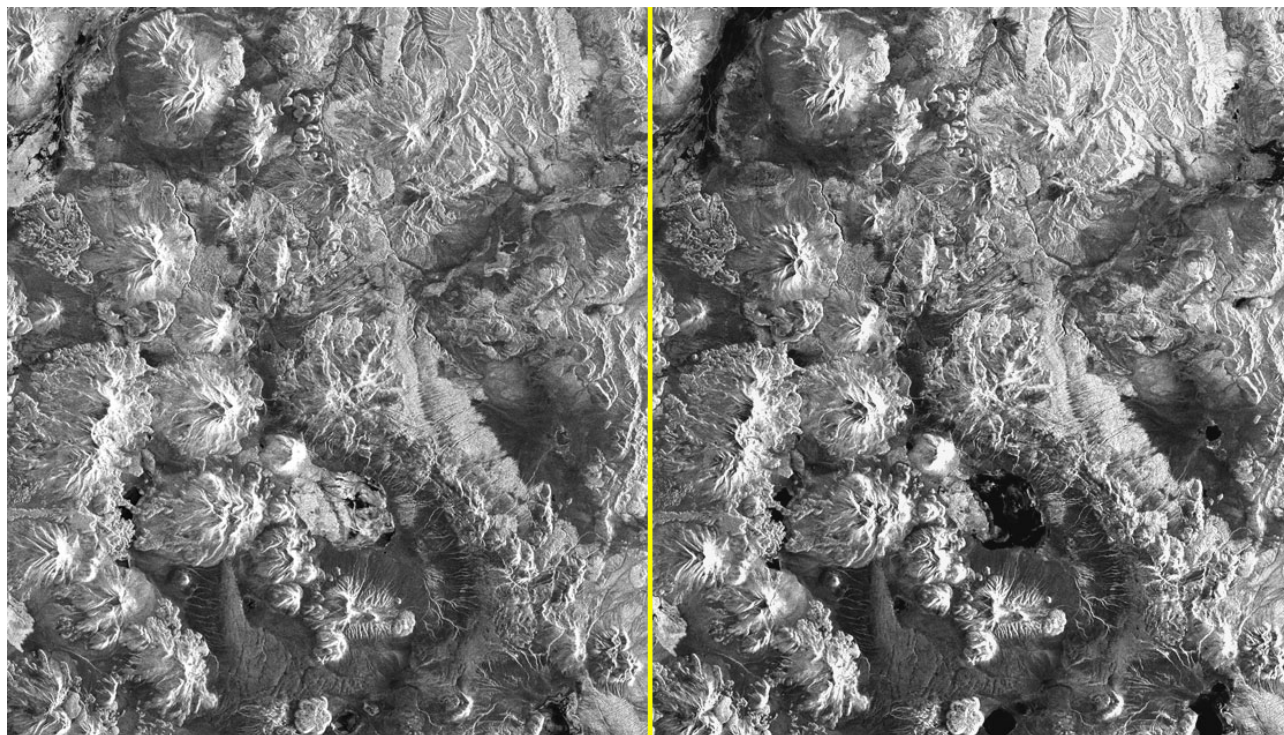


Figura 2: Par estéreo en modo estándar (S3-S6; órbita descendente; alcance terrestre; espaciado de 12,5-m pixel) utilizado en el Proyecto Multiandino. Imágenes RADARSAT: © CSA 1997, 1998; recibido por CCRS; procesado y distribuido por RADARSAT International.

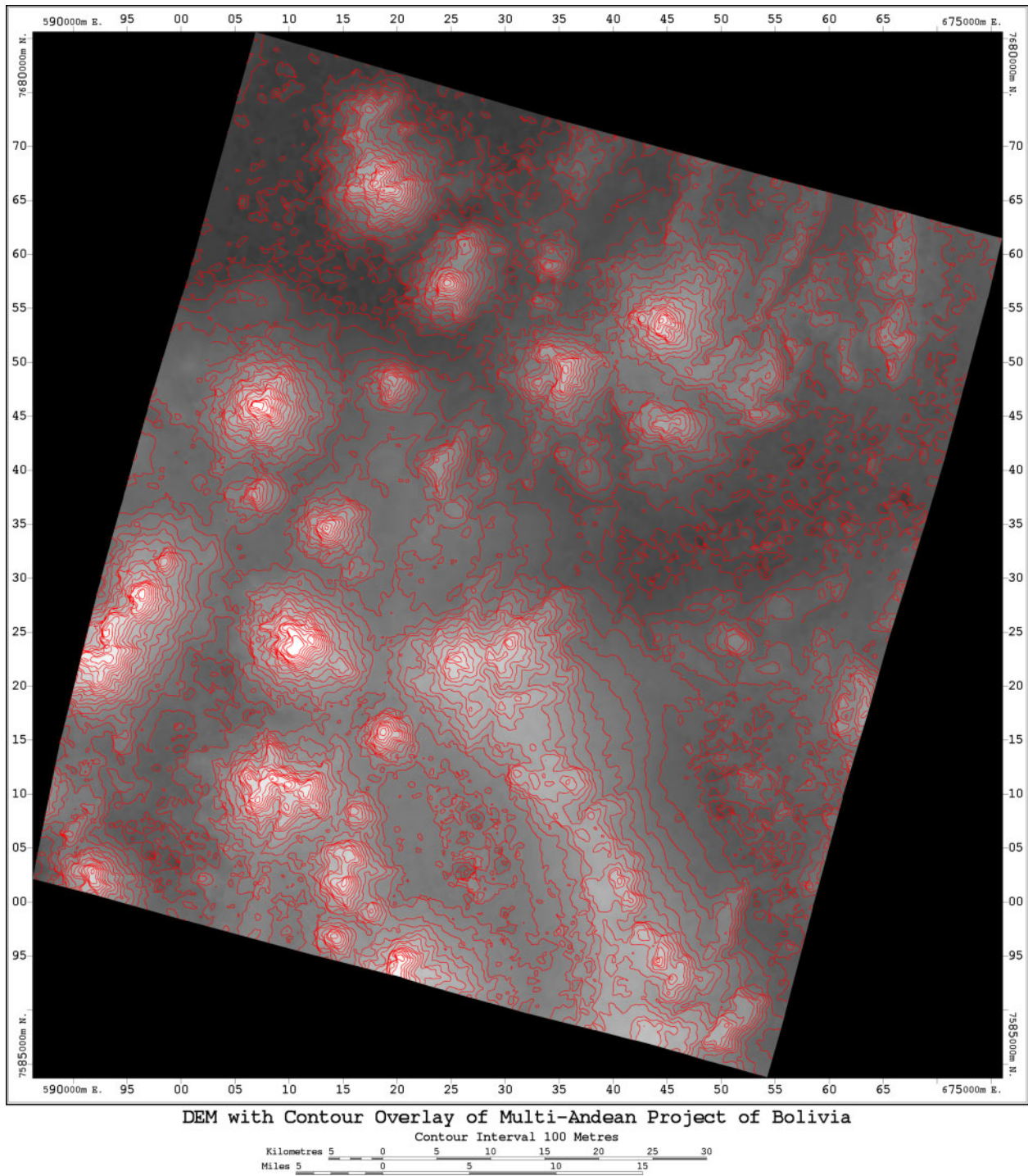


Figura 3: DEM de extracción estéreo con las líneas de nivel a 100-m superpuestas generadas a partir del par estéreo del Proyecto Multiandino utilizando soporte lógico PCI OrthoEngine^{SE}.

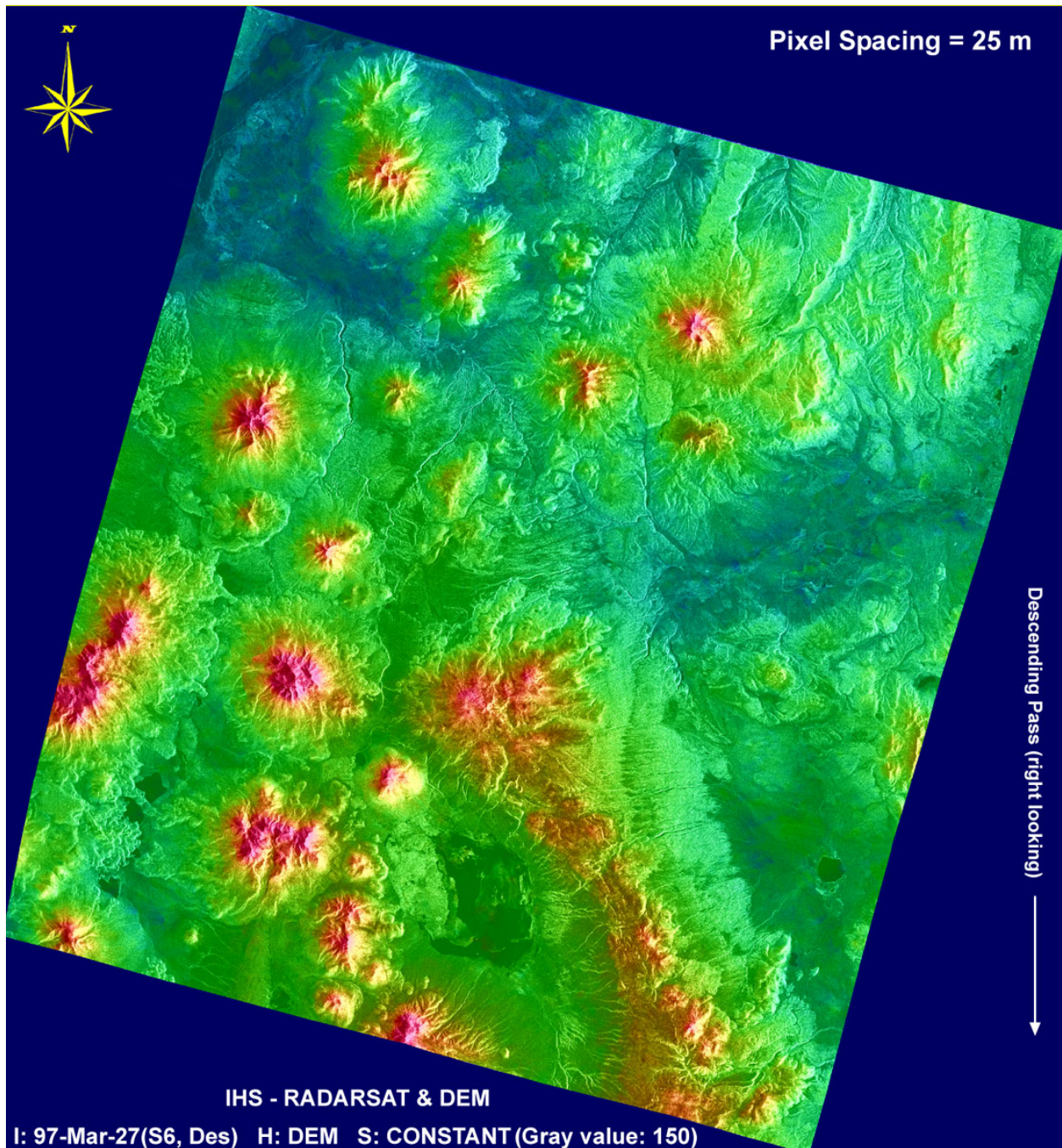


Figura 4: 3D imagen cromo-estereoscópica 3D (espaciado de 25-m pixel) generada a partir de la imagen ortorectificada S6 y del DEM extraído en estéreo del Proyecto Multiandino.

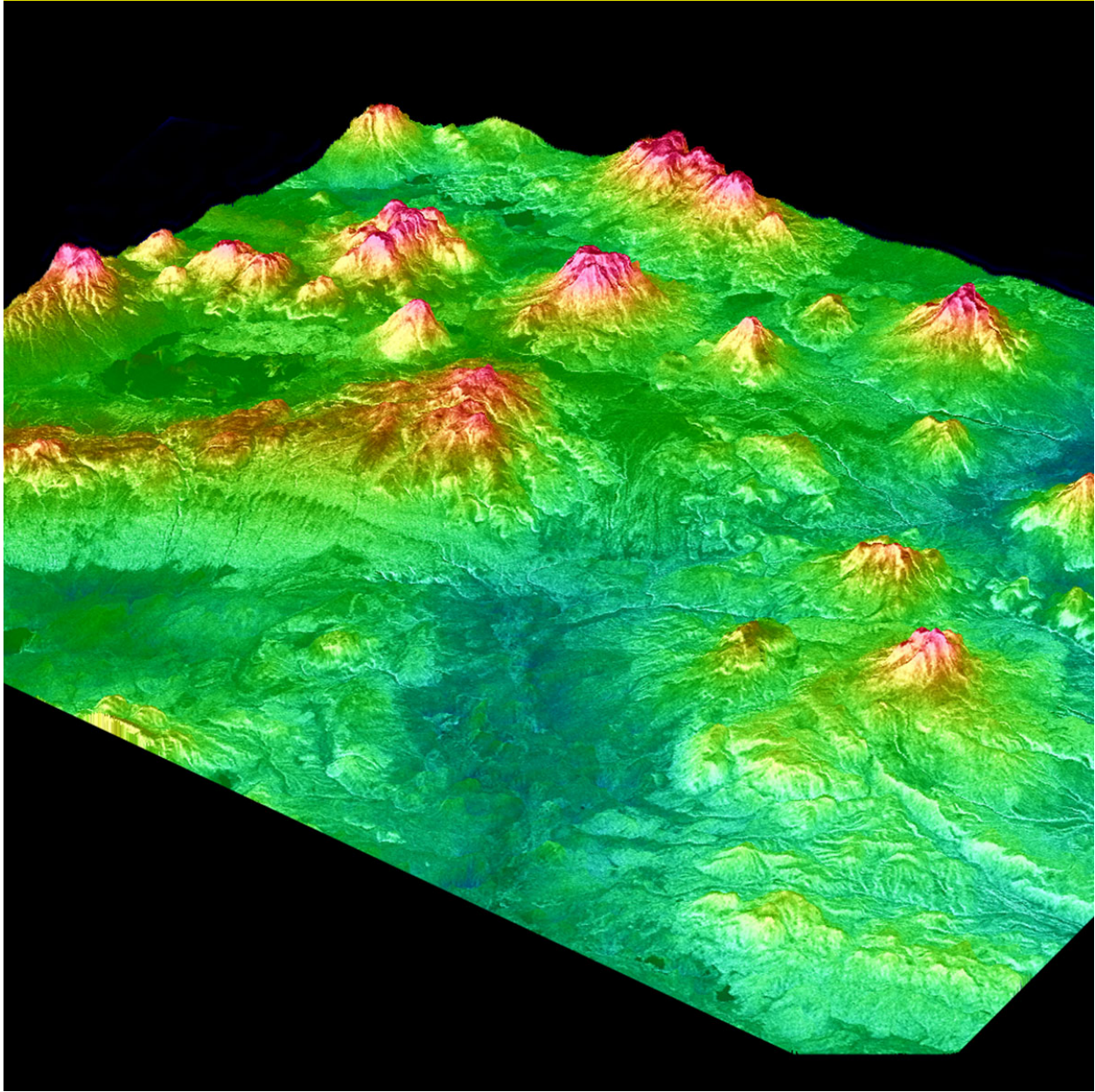


Figura 5: Imagen en perspectiva (espaciado de 25-m pixel) generada a partir de la imagen S6 cromostereoscópica 3D del Proyecto Multiandino superpuesta al DEM extraído en estéreo.

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

Par Estéreo	Relación de paralaje vertical	Tipo de Relieve	Confianza 90% LE90	Error sistemático	Valor mínimo	Valor máximo
F2-F4 Mismo lado	0.15	Bajo	24 m	-4.5 m	-51.2 m	58.2 m
		<i>Moderado</i>	<i>27 m</i>	<i>11.8 m</i>	<i>-36.2 m</i>	<i>90.0 m</i>
		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
		<i>Moderado</i>	<i>36 m</i>	<i>4.2 m</i>	<i>-39.6 m</i>	<i>95.0 m</i>
		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
		<i>Moderado</i>	<i>22 m</i>	<i>-57.5 m</i>	<i>-106.0 m</i>	<i>-6.0 m</i>
		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
		<i>Moderado</i>	<i>46 m</i>	<i>-6.5 m</i>	<i>-81.2 m</i>	<i>42.6 m</i>
		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
		<i>Moderado</i>	<i>59 m</i>	<i>-18.0 m</i>	<i>-116.6 m</i>	<i>42.0 m</i>
		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
		<i>Moderado</i>	<i>29 m</i>	<i>10.9 m</i>	<i>-23.0 m</i>	<i>66.6 m</i>
		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
		<i>Moderado</i>	<i>43 m</i>	<i>-2.0 m</i>	<i>-64.7 m</i>	<i>61.0 m</i>
		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
		<i>Moderado</i>	<i>27 m</i>	<i>6.6 m</i>	<i>-32.0 m</i>	<i>65.6 m</i>
		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
		<i>Moderado</i>	<i>107 m</i>	<i>-7.4 m</i>	<i>-179.0 m</i>	<i>199.0 m</i>
		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
		<i>Moderado</i>	<i>77 m</i>	<i>-2.2 m</i>	<i>-132.2 m</i>	<i>132.8 m</i>
		DEM completo	47 m	-14.3 m	-289.5 m	260.1 m

Puede observarse comparando los distintos resultados en las tres áreas (MDA bajo, moderado y total) que el relieve no es el único parámetro que repercute en la precisión del MDA. 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 tiempo de la captación pueden repercutir en la precisión del MDA. Por ejemplo, en las comparaciones de pares estéreo S4-H3 y S7-H6 las imágenes H3 y H6 ostentan más variaciones radiométricas puesto que el componente de vegetación tiende a ser predominante en la señal de retorno a ángulos grande de incidencias (Boisvert *et al.*, 1997). Además, la imagen H6 (12 de enero de 1997) ostenta un retorno bajo de la señal procedente de campos agrícolas helados. Del mismo modo, el par estéreo S2-S7 ostenta 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 adaptación de la imagen. Un posible motivo del elevado porcentaje de puntos correlados pudiera ser que las fechas de la captación fueron cercanas (24 y 22 de octubre de 1996), según se mencionó anteriormente, con lo que disminuyeron las disparidades radiométricas debidas a la interacción de SAR y la superficie (tales como cambios de la vegetación y del suelo). Por lo demás, la geometría más propicia no sería el único parámetro que explicara estos resultados (LE90, error sistemático y valores min/max) puesto que la disminución del error MDA LE90 total (64%) entre S2-S7 y S1-S7 es superior a su aumento RPV (38%). Un mayor número de ejemplos con otras fechas de captación podría resolver esta ambigüedad.

Con los pares estéreo de lado opuesto, el filtrado de centelleo, reduciendo ligeramente el contraste de la imagen, suaviza el bajo relieve para disminuir la precisión (-17 m por comparación a -15 m) pero reduce las mayores disparidades radiométricas en el relieve moderado para mejorar los resultados (77 m por comparación con 107 m). Sin embargo, estos pares estéreo dan buenos resultados en la totalidad del MDA (34 m y 47 m), debido al relieve general en gentil 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 y tanto las diferencias grandes de paralaje como radiométricas impedirán la observación estéreo y generarán extensas áreas de adaptación errónea en el proceso de correlación. No se recomienda tal par estéreo en terrenos de relieve accidentado.

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

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

Se obtienen los resultados sobre terreno escarpado a partir de otros experimentos en las montañas

rocosas canadienses (Toutin, 2000). La selección adecuada de los pares estéreo redujo a un mínimo las diferencias radiométricas entre las dos imágenes y la superposición del terreno con ángulos de intersección pequeños y ángulos de observación superficiales, respectivamente. Inversamente, para compensar la geometría estéreo más débil, se seleccionó la resolución SAR en modo fino aumentando la precisión MDA. 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 MDA extraído en estéreo con el MDA derivado de un método topográfico preciso muestran LE90 de 41 m y 45 m para el F1-F5 y F2-F4, respectivamente. Estos muestran que una disminución del 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 estéreos 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 las grandes paralajes del terreno si se comparan con una topografía llana u ondulante, tales como las del otro estudio.

Puesto que el tipo de relieve es un parámetro importante en la precisión del MDA, se recomienda firmemente asignar a la precisión del MDA valores que correspondan a distintas áreas del relieve. Además, en la selección del par estereoscópico para generación MDA, deben evaluarse conjuntamente las características geométricas y las radiométricas teniendo en cuenta la interacción del SAR y de la superficie (geometría de la superficie, vegetación, características del suelo, condiciones geográficas, adquisición de la fecha, etc.). Las ventajas de uno pueden compensar las deficiencias del otro. En la Tabla 2 se proporciona una orientación general para adquirir datos RADARSAT estéreo con fines de generación MDA en función del relieve del terreno. Estas directrices muestran que la solución no es exclusiva porque la mayoría del tiempo las imágenes no solamente se utilizan para generación MDA. Los requisitos para la aplicación prevista del MDA 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 por comparación a 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.

Pendientes de relieve del Terreno	Llano 0° - 10°	Ondulante 10° - 30°	Montañoso 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 grande
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)

3.0 INTERFEROMETRÍA

La interferometría radar es un método de alternativa del estereoscópico convencional, para extraer información sobre 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 subsidencia del terreno o de movimiento de 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 distintos 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 la alcance, en la escala de sublongitud 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 suelo.

Se llevaron a la práctica las primeras propuestas y experimentos de interferometría radar en el campo de mapas planetarios y del 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

independientes por 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 1999 un tal sistema de antena doble, la Misión topográfica radar de nave espacial (SRTM), .

3.1 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 aproximadamente de 1 km. Para el RADARSAT varía entre aproximadamente 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: representando 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 sea 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 la línea base que 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 en 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 períodos que son de hasta un año (Massonnet and Feigl, 1998). Puesto que el RADARSAT tiene un ciclo de repetición de 24 días, estos representa 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 período 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 con los datos de pasadas repetidas de con el SAR del ERS-1 (Wegmüller *et al.*, 1995). La correlación interferométrica sobre zonas de bosques ha demostrado ser muy inferior a las realizadas sobre copas de árboles abiertas, vegetación pequeña, suelos áridos y zonas urbanas. Los resultados apoyan firmemente los estudios de reforestación, el trazado de mapas de bosques y la supervisión puesto que fue posible no solamente distinguir estaciones de bosques coníferos, caedizos 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 se salen del 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 2π , y por lo tanto en la mayoría de los casos debe “desenvolverse” antes de que pueda utilizarse (Goldstein *et al.*, 1988). La fase de interferograma tiene cuatro componentes: la fase topográfica, la fase de desplazamiento, la fase atmosférica y la fase del ruido del sistema.

3.2 Generación del MDA

La fase topográfica es el componente del interferograma debido a la topografía. Es un componente de fase del interferograma que se utiliza para la obtención de un MDA. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de MDA 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 (MDA 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 MDA 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

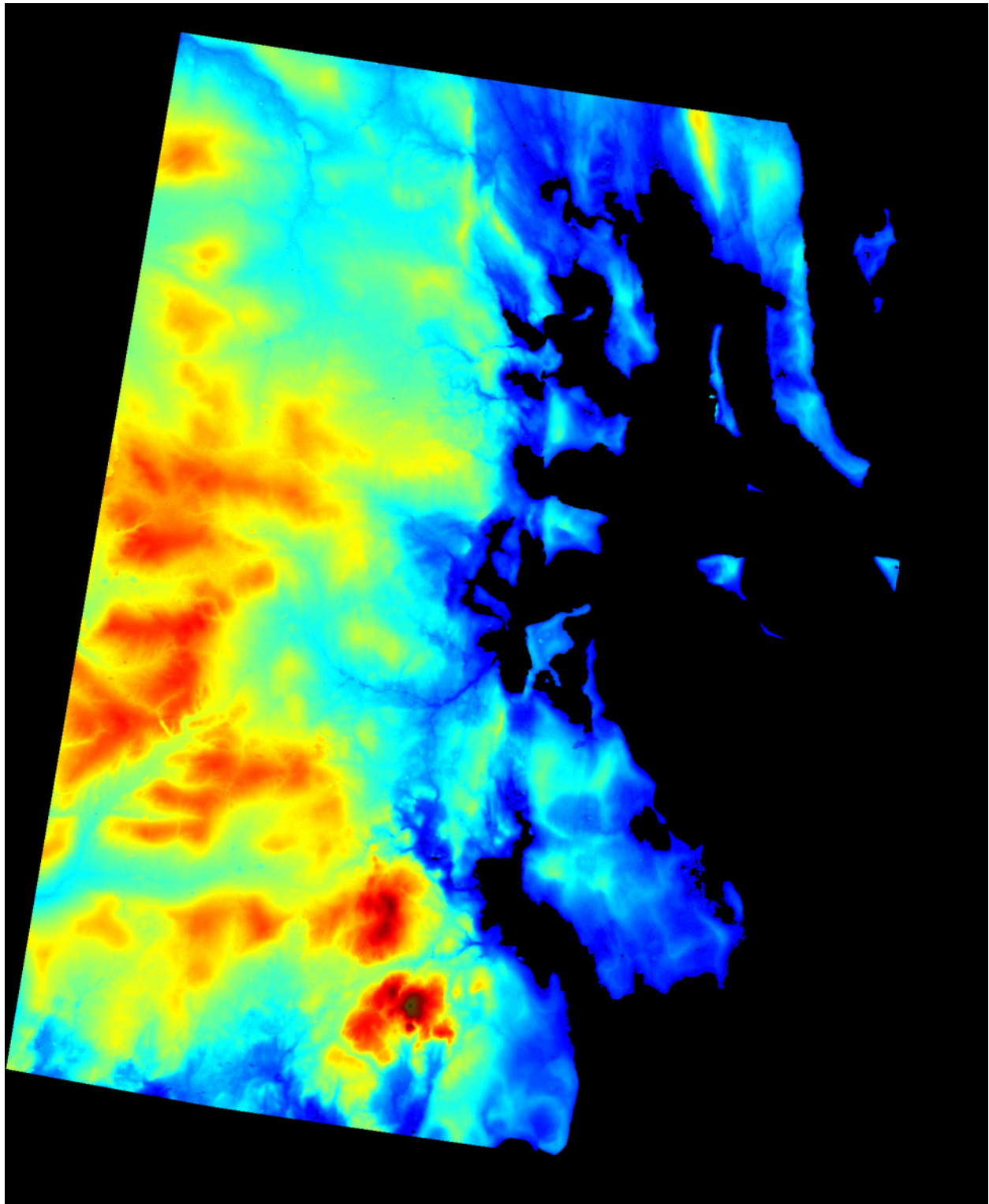


Figura 6: DEM de Isla Bathurst Island obtenida con interferometría de modo-fino de RADARSAT (F5; órbita descendente; 4 de marzo y 28 de marzo, 1996; línea de base=1064 m). (cortesía, Atlantis Scientific.)

fase que será difícil 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 km 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 bosques y vegetación. Las lagunas de datos pueden también llevar o también ser el resultado de sombras y superposición 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 y 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 MDA resultante.

3.3 Medición del desplazamiento

La fase de desplazamiento es el componente debido 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 su desplazamiento relativo. 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 MDA, puede trazarse el mapa de campo de desplazamiento de un terremoto (Massonnet *et al.*, 1993). Si no se dispone de ningún MDA 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 período entre las tres captaciones radar (Zebker *et al.*, 1994b). La estimación del campo de desplazamiento utilizando solamente los datos radar es 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, 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 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 ascendiendo y una descendiendo). 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 en rápido movimiento, puede calcularse directamente el desplazamiento bidimensional a partir de dos imágenes interferométricas coherentes aplicando una técnica de correlación de centelleo (Gray *et al.*, 1998). En la Figura 7 se muestran imágenes 3D de la

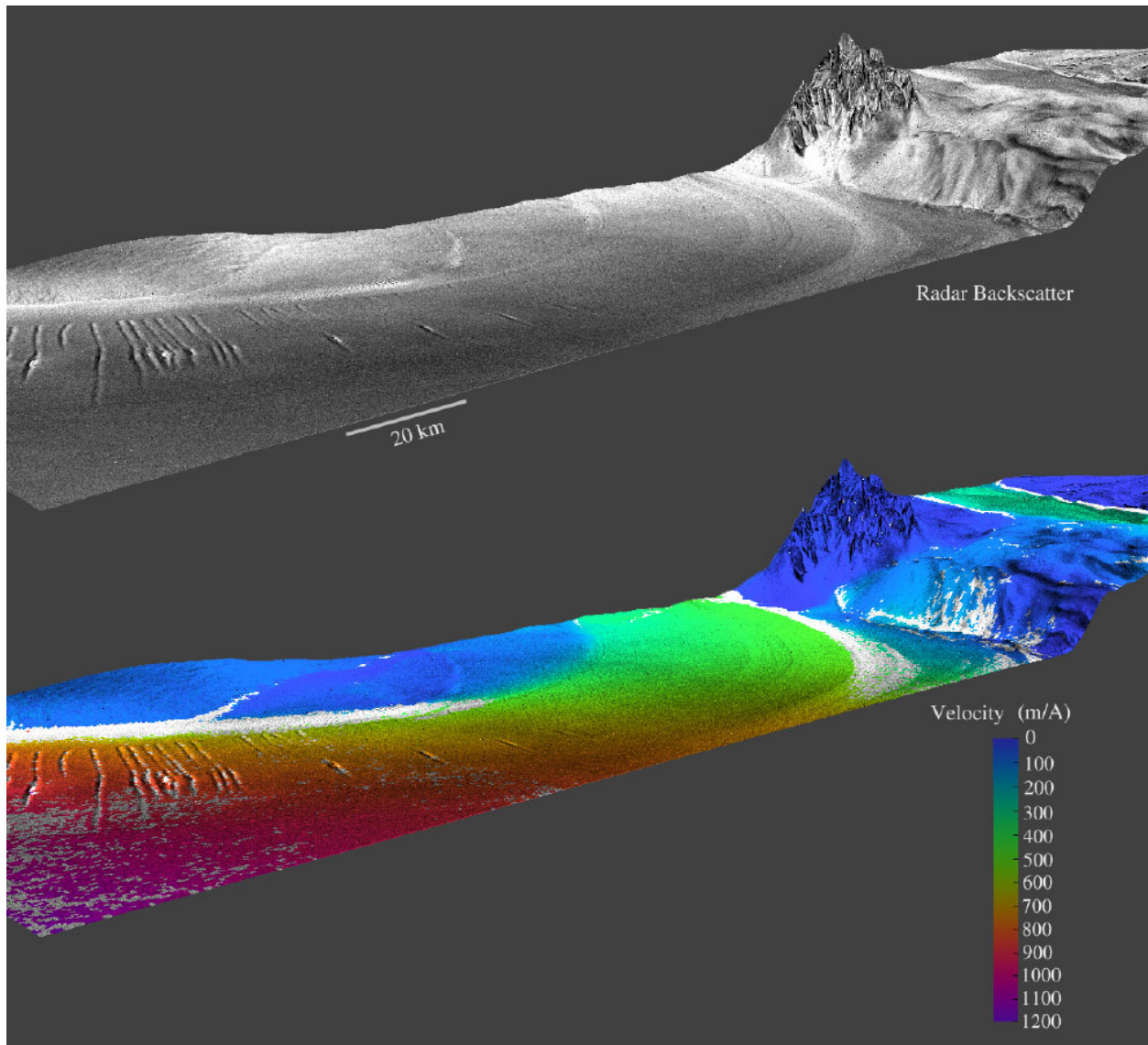


Figura 7: Magnitud-3D y velocidad de la capa de hielo Filchner, Antártida, a partir de datos RADARSAT recopilados durante la misión de trazado de mapas de la Antártida del 19 de septiembre al 20 de octubre, 1997.

magnitud y velocidad de la capa de hielo Filchner Ice Shelf, Antártida, obtenida usando la técnica de correlación de centelleo 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 de centelleo 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 derrota y perpendicular a la derrota. En el modo haz fino de RADARSAT la resolución de desplazamiento es aproximadamente de 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 se está actualmente aplicando con datos de RADARSAT en la Misión de trazado cartográfico de la Antártida para medir los movimientos del hielo (Gray *et al.*, 1998) y para analizar la dinámica de flujo de 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 subsidencia en color (un máximo de 10 cm) durante 70 días en 1992. La subsidencia debida a 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 MDA y mapas de deformación utilizando interferometría ERS-1, y también se utilizó una imagen de haz fino de RADARSAT para la imagen radar superpuesta al MDA (cortesía, Atlantis Scientific).

3.4 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). El culpable habitual son las variaciones de vapor de agua atmosférico en la troposfera lo que retarda la propagación y lleva a una variación adicional de fase. Esta variación de fase corrompe por lo tanto 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 MDA 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 de reconocer estos efectos y de adoptar una estrategia para reducir al mínimo los errores en la generación de MDA y en la medición del desplazamiento. En el caso de generación MDA, Ferretti *et al.* (1997) han demostrado que la combinación de interferogramas múltiples puede mejorar la calidad de un producto MDA 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 por comparación a 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 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.

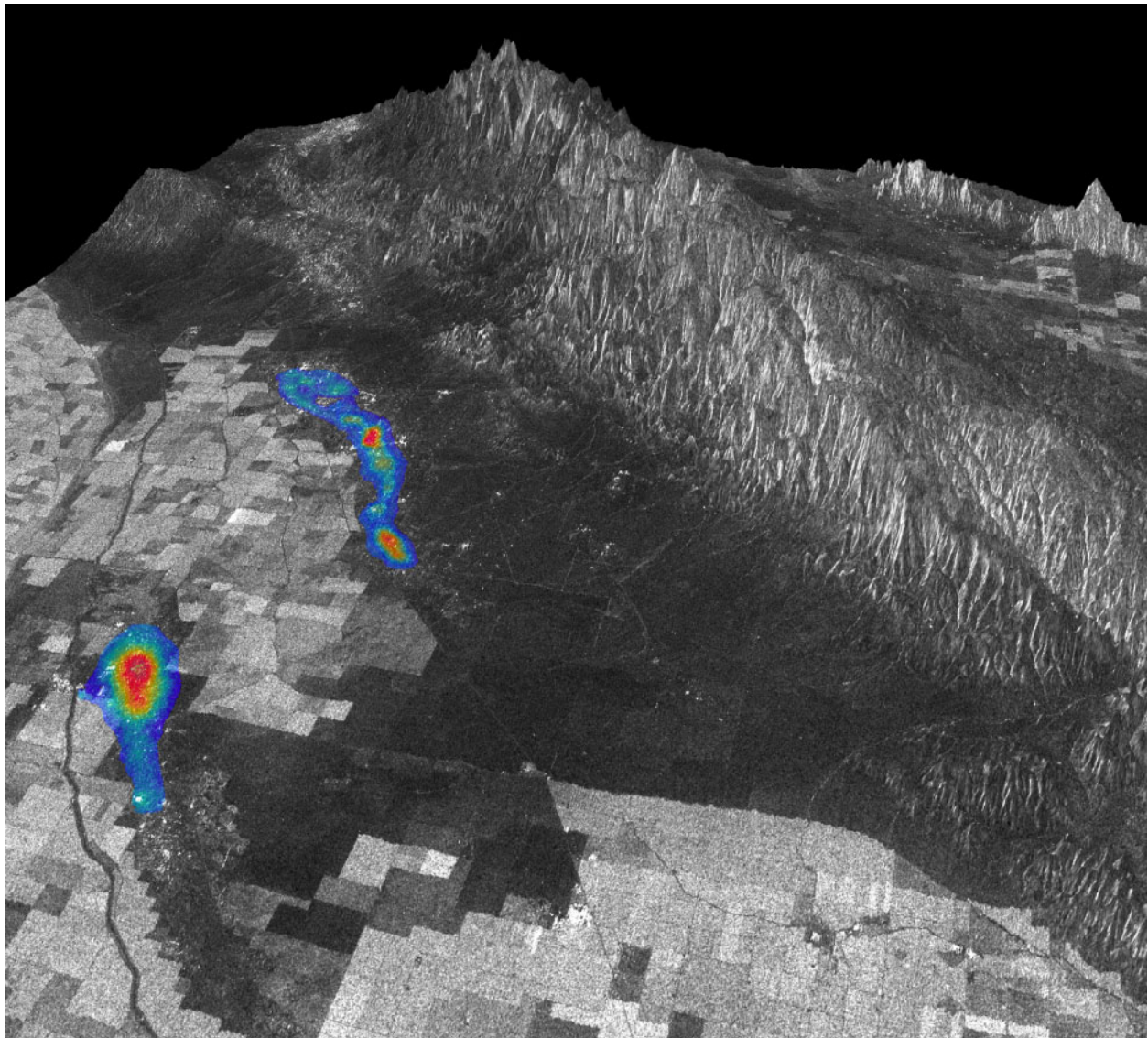


Figura 8: Vista 3D de campos petrolíferos Belridge en California, mostrando en color la subsidencia (un máximo de 10 cm) durante 70 días en 1992. Subsidencia debida a explotaciones petrolíferas causó la rotura de la presa hidroeléctrica de California en el decenio del 60 con pérdida de vida y daños de 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)

3.5 Interferometría con una sola pasada

También pueden generarse datos interferométricos mediante en una sola pasada, con sistemas

radar interferométricos de doble antena tales como el sistema de a bordo CV-580 del CCRS (Gray *et al.*, 1995) y el SRTM cuyo lanzamiento está programado en septiembre de 1999. 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), puesto que no están 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 interferométrico 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.

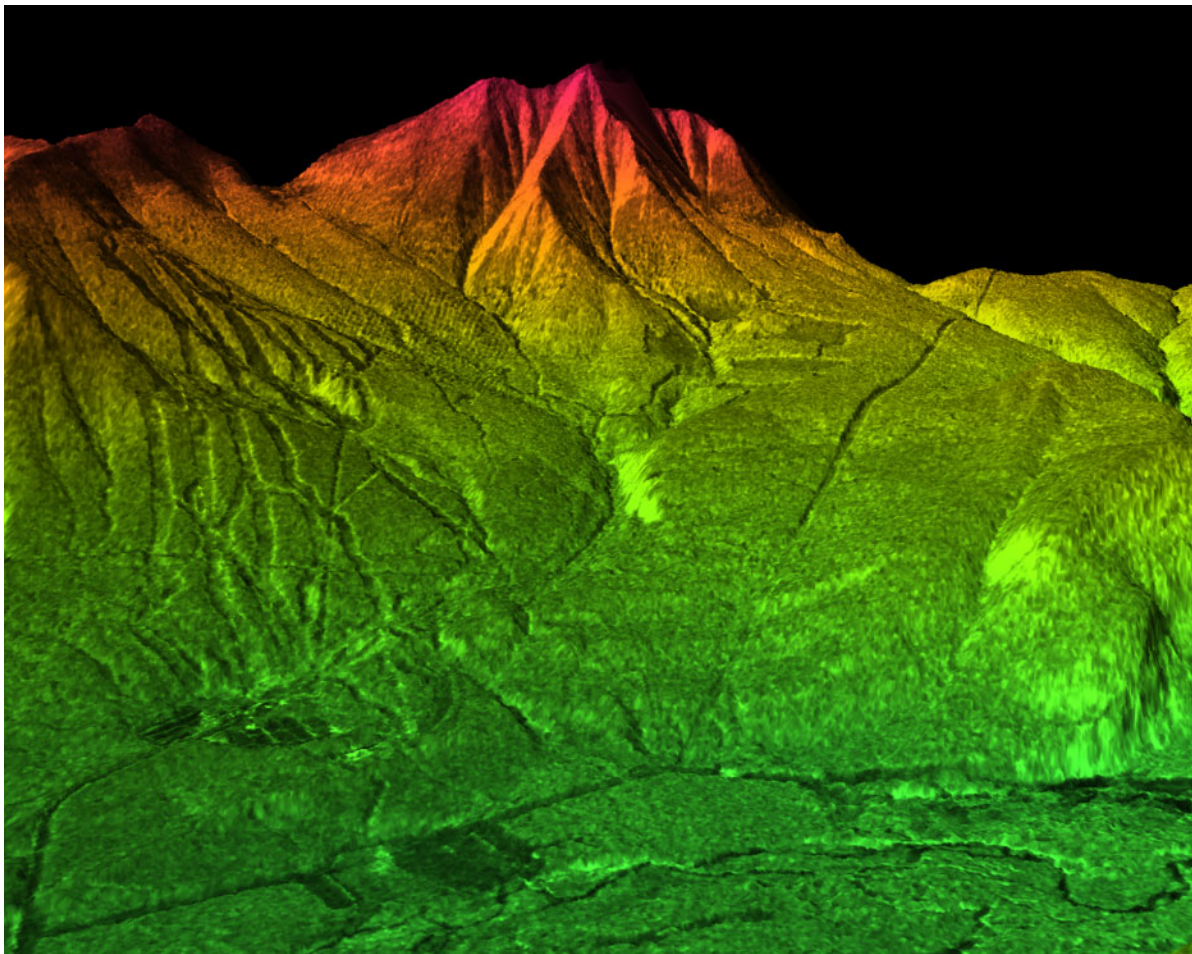


Figura 9: Vista-3D de la región Kananaskis, Alberta, Canadá obtenida con el modo de trazado de mapas interferométrico del radar CV-580 de Convair CCRS. Obsérvese la colina de esquí Nakiska, lugar de las pistas de esquí en los juegos olímpicos de 1988.

4.0 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 datos distintos (fotografías espaciales, lector VIR, SAR, altimetría) con distintos formatos (análogo, digital) y por distintos métodos (sombras/sombreado; estereoscopia, interferometría, polarimetría) aprovechando las características distintas 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 por 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.

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 fotogrametría estéreo 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 ocasionalmente la realidad se ha quedado atrás de las previsiones.

La evolución de las diversas tecnologías de generación MDA se hace también eco de las actuales tendencias comerciales y científicas y de la “moda”. La estereoscopia SAR era muy popular en el decenio de 1980 con el desarrollo de ecuaciones radargramétricas y los primeros resultados interesantes y prometedores con el SIR-B. Sin embargo, no estaban suficientemente maduros el procesamiento de imágenes SAR y las correspondientes tecnologías para extraer los datos de elevación (tales como adaptación de la imagen), y esto llevó a un declive temporal. En comparación con los datos VIR, el mismo cuarteamiento 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 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 de la I&D en adaptación de imágenes lograda mediante SPOT a finales del decenio de 1980 y con las nuevas tecnologías de computadoras.

Por último, es también obvio que la I&D en 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 MDA debería aplicarse la característica complementaria de los diversos sensores, métodos y procesamientos. Esta característica complementaria de los sensores se ha 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 a su capacidad “todo tiempo” para obtener la segunda imagen del par-estéreo.

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

También se aplican características complementarias a distintos niveles:

1. utilizando dos pares estereoscópicos SAR de trayectorias 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 adaptación visual de germinación de puntos con fines de adaptación automática o para el procesamiento posterior y para la edición de los MDA en bruto (áreas de occlusión, 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 MDA.

Además, se ha demostrado en la mayoría de los experimentos anteriores que el usuario ha de adoptar juicio y decisiones a distintas etapas del procesamiento sea cual fuere el nivel de procesamiento automático para obtener el producto MDA final. El “sabor” de los usuarios podía ser un complemento favorable de la capacidad de la computadora en las diversas etapas del procesamiento.

En el pasado, se han generado MDA de alta calidad con la fotogrametría tradicional por lo que se aplicaron a muchos fines. En la actualidad, se considera que los MDA 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 MDA no son fáciles de determinar debido a sus múltiples usos por parte de distintas comunidades de usuarios, se prevé generar MDA mundiales al año 2000, cuando el Laboratorio Radar Espacial EUA/Alemania se embarque en una misión de la nave espacial EUA, el SRTM. Se utilizará interferometría en una sola pasada a dos frecuencias, con una segunda antena receptora para generar modelos MDA

sobre todas las superficies de la tierra entre las latitudes de -56° y $+60^{\circ}$ (Jordan *et al.*, 1995; Werner, 1997). La precisión del MDA obtenido que se genere mediante la interferometría de radar estadounidense en banda-C sería de una precisión DTED del orden de nivel-1. La precisión del MDA 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 MDA mundial con una sola especificación una “apuesta arriesgada”? ¿Son de ayuda suficiente estas estadísticas de salida que describen el MDA mundial? ¿Podemos aceptar MDA que no puedan producir en un sentido mapas con “líneas de nivel de buena apariencia”? ¿Estamos hoy día satisfechos con la producción de “MDA de desecho” a una escala particular y que quizás son meramente buenos para una determinada aplicación? ¿Se satisfarán los requisitos de todos los usuarios MDA? Los otros revendedores de datos de satélites no lo esperan así, puesto que al mismo tiempo (1999-2000) hay propuestas de lanzamientos de organizaciones EUA, 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 derrota y en sentido perpendicular.

5.0 AGRADECIMIENTOS

Los autores desearían dar las gracias a Ginette Frenette y Shannon Ross por su ayuda en la preparación del manuscrito y Liyuan Wu por procesamiento de imágenes RADARSAT del Proyecto Multiando. Se reconoce la valiosa aportación del Dr. Bert Guindon quien nos ayudó a mejorar la calidad del material. Por último, gracias a la revista SELPER por la oportunidad de promover el uso de radar, y en particular RADARSAT, para aplicaciones de cartografía topográfica. Las imágenes RADARSAT del Proyecto Multiandino son cortesía del programa GlobeSAR-II.

6.0 REFERENCIAS

Biegert, E.K., J.L. Berry, and S.D. Oakley, “Subsidence monitoring using spaceborne interferometric SAR,” *Proceedings of the Symposium RADARSAT ADRO*, CD-ROM, October 13-15, 1998.

Boisvert, J.B., T. J. Pultz, R. J. Brown and B. Brisco, “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 1995.

Buchroithner, M., “Stereo-viewing from Space”, *Advances in Space Research*, vol. 19, no.1, pp. 29-40, 1989.

Canadian Space Agency, “Bringing Radar Application Down to Earth”, *Proceedings of the RADARSAT ADRO Symposium*, Montreal, Canada, CD-ROM, October 13-15, 1998.

Carlson, G.E., "An Improved Single Flight Technique for Radar Stereo", *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, vol.11, pp. 199-204, 1973.

Domik, G., F. Leberl and J. Cimino, "Dependence of Image Grey Values on Topography in SIR-B Images", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, no. 5, pp.1013-1022, 1988.

Domik, G., "Evaluation of Radar Stereoviewability by Means of Simulation Techniques", *Proceeding IGARSS'84*, Paris, France, ESA-SP-215, pp. 623-646, 1983.

Dowman, I.J., Z.-G. Twu and P.H. Chen, "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, 1997.

ESA – European Space Agency, "New Views of the Earth: Scientific Achievements of ERS-1", *ESA SP1176/I Report*, Paris, France, 162 pages, 1995.

Ferretti A., C. Prati, F. Rocca, and A. M. Guarnieri, "Multi-baseline SAR interferometry for automatic DEM reconstruction," *Proceedings of the 3rd ERS Symposium*, Florence, Italy, 1997.

Forster, R.R., K.C. Jezek, H. Gyoo Sohn, A.L. Gray and K.E. Mattar, "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, 1998.

Fullerton, J.K., F. Leberl and R.E. Marke, "Lado opuesto SAR Image Processing for Stereoviewing", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, no. 9, pp.1487-1498 1986.

Gabriel, A.K., R. Goldstein and H. Zebker, "Mapping Pequeña Elevation Changes Over Grande Areas: Differential Radar Interferometry", *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, no. B7, pp. 9183-9191, 1989.

Gabriel, A.K. and R.M. Goldstein, "Crossed-Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results from SIR-B", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, no. 5, pp. 857-872, 1988.

Geudtner, D., and P. Vachon, "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, 1997).

Goldstein, R., "Atmospheric Limitations to Repeat-Track Radar Interferometry", *Geophysical Research Letters*, vol. 22, pp. 2517-2520, 1995.

Goldstein, R.M., H. Engelhardt, B. Kamb and R.M. Frolich, "Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream", *Science*, vol. 262, pp. 1525-1530, 1993.

Goldstein, R.M., H. Zebker and C. Werner, "Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping", *Radio Science*, vol. 23, no. 4, pp. 713-720, 1988.

Gracie, G., J.W. Bricker, R.K. Brewer and R.A. Johnson, "Stereo Radar Analysis", *Fort Belvoir, VA, USA*, U.S. Engineering Topography Laboratory, Report FTR – pp. 1339-1, 1970.

Graham, L.C., "Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping", *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 6, pp.763-768, 1974.

Gray, A.L., K.E. Mattar, P.W. Vachon, R. Bindschadler, K.C. Jezek and R. Forster, "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, 1998.

Gray, A.L., K.E. Mattar, and P.W. Vachon, "RADARSAT interferometric SAR results obtained over Antarctic terrain", *Proc. CEOS Workshop*, ESA-ESTEC, pp. 67-69, Noordwijk, The Netherlands, Feb., 1998.

Gray, A.L., K.E. Mattar, and M.W.A. van der Kooij, "Cross-track and Along-track Airborne Interferometric SAR at CCRS," *Proceedings of the Seventeenth Canadian Symposium on Remote Sensing*, Saskatoon, Saskatchewan, 1995.

Hagberg, J.O., L.M.H. Ulander and J. Askne, "Repeat-Pass Interferometry Over Forested Terrain", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 2, pp. 331-340, 1995.

Jordan, R.L., B.L. Huneycutt and M. Werner, "The SIR-C/X-SAR Synthetic Aperture Radar", *IEEE-Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 4, pp.829-839, 1995.

Joughin, I.R., A.L. Gray, B. Bindschadler, S. Price, D. Morse, C. Hulbe, K. Mattar, C. Werner, "Tributaries of West Antarctic ice streams revealed by Radarsat interferometry," accepted for publication in *Science*, July 1999.

Joughin I.R., R. Kwok, and M.A. Fahnestock, "Interferometric estimation of three-dimensional ice-fBajo using ascending and descending passes," *IEEE Transactions Geoscience. Remote Sensing*, vol. 36, pp. 25-37, Jan., 1998.

Kaupp, V., L. Bridges, M. Pisaruk, H. MacDonald and W. Waite, "Simulation of Spaceborne Stereo Radar Imagery: Experimental Results", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 21, no.2, pp. 400-405, 1983.

Kobrick, M., F. Leberl and J. Raggam, "Radar Stereo Mapping with Crossing Flight Lines", *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 12, no. 9, pp.132-148, 1986.

La Prade, G., "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, 1970.

La Prade, G., "An Analytical and Experimental Study of Stereo for Radar", *Photogrammetric Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 294-300, 1963.

Leberl, F., K. Maurice, J.K. Thomas and M. Millot, "Automated Radar Image Matching Experiment", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 49, no. 3, pp. 19-33, 1994.

Leberl, F., "Radargrammetric Image Processing", *Artech House*, Norwood, USA, 595 pages, 1990.

Leberl, F., G. Domik, J. Raggam and M. Kobrick, "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, 1986a.

Leberl, F., G. Domik, J. Raggam, J. Cimino and M. Kobrick, "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, 1986b.

Leberl, F., "Accuracy Analysis of Stereo Side Looking Radar", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 45, no. 8, pp.1083-1096, 1979.

Leberl, F., "Imaging Radar Applications to Mapping and Charting", *Photogrammetria*, vol. 32, no. 3, pp.75-100, 1976.

Li, F. and R.M. Goldstein, "Studies of Multi-Baseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 1, pp.88-97, 1990.

Lizeca, J. L., W. M. Moon, C. Hutton, L. Wu and C. W. Lee, "Investigation of Pastos Grandes (Bolivia) Volcanic Features with RADARSAT", *Proceedings of IGARSS'99*, Hamburg, Germany, CD-ROM, June 28- July 2, 1999.

Maître, H., F. Turpin et J.-M. Nicolas, «Cartographie automatique radar : l'apport du traitement d'images», *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 148, pp. 6-14, 1997.

Manual of Remote Sensing, Third Edition, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, Va., USA, 1998.

Marinelli, L., Th. Toutin et I. Downan, «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, 1997.

Marr, D., "Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information", *W.H. Freeman and Co.*, San Francisco, California, USA, 1982.

Marr, D. and E. Hildreth, "Theory of Edge Detection", *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. B207, pp. 187-217, 1980.

Marr, D. and T. Poggio, "A Computation of Stereo Disparity", *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. B194, pp. 283-287, 1977.

Massmann, F.-H., Ch. Reigber, R. König, J.C. Raimondo, C. Rajasenan, "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, 1993.

Massonnet, D., "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, 2000.

Massonnet, D. and K.L. Feigl, "Radar Interferometry and its Application to Changes in the Earth's Surface", *Reviews of Geophysics*, vol. 36, no. 4, pp. 441-500, 1998.

Massonnet, D. and K. Feigl, "Discrimination of Geophysical Phenomena in Satellite Interferograms", *Geophysical Research Letters*, vol. 22, pp. 1537-1540, 1995.

Massonnet, F.-H. and T. Rabaute, "Radar Interferometry: Limits and Potential," *IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing*, vol. 31, no. 2, March 1993.

Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragana, G. Peltzer, K. Feigl and T. Rabaute, "The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry", *Nature*, vol. 364, pp. 138-142, 1993.

Mattar, K.E., A.L. Gray, D. Geudtner, P.W. Vachon, "Interferometry for DEM and Terrain Displacement: Effects of Inhomogeneous Propagation," *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 25, no. 1, pp. 60-69, March 1999.

Mattar, K.E., Vachon, D. Geudtner, A.L. Gray, I. Cumming, M. Brugman, "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, 1998.

Paillou, Ph. and M. Gelautz, "The Optimal Gradient Matching Method: Application to X-SAR and Magellan Stereo-Images", *IGARSS'98*, Seattle, Washington, USA, 6-10 July, pp. 2357-2359, 1998.

Parashar, S., E. Langham, J. McNally and S. Ahmed, "RADARSAT Mission Requirements and Concepts", *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no. 4, pp. 280-288, 1993.

PCI Enterprises, Inc., "OrthoEngineRE and OrthoEngineRE 3D", *Reference Manual*, Richmond Hill, Ont., Canada, Version 6.2, March 1998.

Polidori, L. et Th. Toutin, «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, 1998.

Polidori, L., «Cartographie radar», *Gordon and Breach Science Publishers*, Amsterdam, The Netherlands, 287 pages, 1996.

Polidori, L., "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, 1991.

Raggam J. and A. Almer, "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, 1996.

Raggam, J., A. Almer, W. Hummelbrunner and D. Strobl, "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 26-28 May, 1993.

Raggam, J. and A. Almer, "A Multi-Sensor Stereo-Mapping Experiment", *Proceedings of the ACSM/ASPRS/Auto Carto Annual Convention Baltimore*, MD, vol. 4, pp. 173-182, 1991.

Raggam, J. and F. Leberl, "SMART- a Program for Radar Stereo Mapping on the Kern DSR-1", *Proceedings of the ASPRS Annual Convention*, pp. 765-773, 1984.

Ramapriyan H., J. Strong, Y. Hung and C. Murray, "Automated Matching Pairs of SIR-B Images for Elevation Mapping", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 24, no. 4, pp. 462-472, 1986.

Rodgers, A.E.E., and R.P. Ingalls, "Venus Mapping: The Surface Reflectivity by Radar Interferometry", *Sciences*, vol. 165, pp. 797-799, 1969.

Rosenfield, G.H., "Stereo Radar Techniques", *Photogrammetric Engineering*, vol. 34, pp.586-594, 1968.

Simard R., F. Plourde and Th. Toutin, "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, 1986.

Pequeña, D., C. Werner, and D. Nuesch, "Geocoding of ERS-1 INSAR-derived Digital Elevation Models", *EARSeL Journal Advances in Remote Sensing*, vol. 4, no. 2, Oct. 1995.

Sylvander, S., D. Cousson et P. Gigord, «Étude des performances géométriques des images RADARSAT», *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 148, pp. 57-65, 1997.

Tarayre H.D., and D. Massonnet, “Atmospheric propagation heterogeneities revealed by ERS-1 interferometry,” *Geophysical. Research Letters*, vol. 23, pp. 989-992, 1996.

Thomas, J. and W. Kober, “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, 1990.

Toutin, Th., “Elevation Modelling from Satellite Data” to appear in Chapter of *Encyclopedia of Analytical Chemistry: Instrumentation and Applications*”, John Wiley and Sons, Chichester, UK, 2000.

Toutin, Th., “Evaluation of Radargrammetric DEM from RADARSAT Images in High Relief Areas”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 2, pp. 782-789, 2000.

Toutin, Th., “Error Tracking of Radargrammetric DEM from RADARSAT Images”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, pp. 2227-2238, 1999a.

Toutin, Th., “Stereo-Mapping with SPOT-P and ERS-1 SAR Images”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, no. 15, pp. 1657-1674, 1999b.

Toutin, Th. and C. Vester, “Remote Sensing Tutorial: Radar and Stereoscapy”, *Canada Centre for Remote Sensing web*, <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/sradar/indexe.html>, 1999.

Toutin, Th. and S. Amaral, “Stereo RADARSAT Data for Canopy Height in Brazilian Forests”, *Canadian Journal for Remote Sensing*, vol. 25, no. 3, pp. 189-199, 1999.

Toutin, Th., «Evaluation de la précision géométrique des images de RADARSAT», *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 24, no.1, pp. 80-88, 1998.

Toutin, Th., “Opposite-side ERS-1 SAR Stereo Mapping Over Rolling Topography”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 2, pp. 543-549, 1996.

Toutin, Th., “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, 1995.

Twu, Z.-G. and I. Dowman, “Automatic Height Extraction from ERS-1 SAR Imagery”, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 31, no. B2, pp. 380-383, 1996.

Usai, S. and R. Klees, “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, 21-23 Oct., 1998.

Vachon, P., D. Geudtner, L. Gray and R. Touzi, “ERS-1 Synthetic Aperture Radar Repeat-Pass Interferometry Studies: Implications for RADARSAT”, *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 21, no. 4, pp. 441-454, 1995.

Wegmüller, U., Werner, C.L., Nüesch, D., and Borgeaud, M., “Land-surface analysis using ERS-1 SAR interferometry”, *ESA Bulletin*, vol. 81, pp.30-37, 1995.

Wegmüller, U. and Ch. Werner, “SAR Interferometric Signature of Forest”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 2, pp. 1153 – 1161, 1995.

Werner, M., “Shuttle Radar Topography Mission”, *Proceedings of ISPRS Workshop: Sensors and Mapping from Space*, Hannover, Germany, pp. 9-11 Sept. 29-Oct. 2, 1997.

Yelizavetin, I.V. and Ye. A. Ksenofontov, “Precision Terrain Measurement by SAR Interferometry”, *Mapping Science sand Remote Sensing*, vol. 33, no. 1, pp. 1-19, 1996.

Yelizavetin, I.V., “Digital Terrain Modeling from Radar Image Stereopairs”, *Mapping Science sand Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 151-160, 1993.

Yoritomo, K., “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, 1972.

Zebker, H.A., P.A. Rosen, and S. Hensley, “Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps”, *Journal Geophysical Research*, vol. 102, pp.7547-7563, 1997.

Zebker, H.A., C. Werner, P.A. Rosen and S. Hensley, “Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 4, pp. 823-836, 1994.

Zebker, H.A., P.A. Rosen, R.M. Goldstein, A. Gabriel, and C.L. Werner, “On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake”, *Journal Geophysical Research*, vol. 99, no. B10, pp. 19,617-19,634, 1994.