



**UNCUYO**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD  
DE INGENIERÍA**

DOCTORADO EN INGENIERÍA

DESARROLLO DE ALGORITMO DE  
CONSTRUCCIÓN Y CORECCIÓN DE  
MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN  
MEDIANTE INTERFEROMETRÍA DE  
IMÁGENES DE RADAR

Pablo Andrés Eulliadés

TESIS DOCTORAL

Director: Dr. Marcelo Javier Vénere

Mendoza, 2004

*Agradecimientos:*

*A mi familia; padres, hermanos y novia por su apoyo en esta aventura.*

*Al equipo de trabajo del CEDIAC, del PLADEMA y a Benjamin Brooks porque su aporte fue fundamental en el desarrollo de esta tesis.*

*A CONICET, Agencia Nac. de Promoción Científica y Tecnológica, CONAE, Repsol YPF, Wintershall Energía, por confiar en mi trabajo.*

## CONTENIDOS

CONTENIDOS.....	3
TABLA DE ILUSTRACIONES .....	5
LISTA DE TABLAS .....	8
Abstract.....	9
Resumen .....	9
INTRODUCCION.....	10
Motivación.....	10
¿Qué es un Modelo Digital de Elevación? .....	11
Métodos utilizados para construir un MDE.....	12
Relevamientos a partir de mediciones directas.....	12
Relevamientos a partir de mediciones indirectas .....	13
Estereoscopia óptica .....	13
Radargrametría .....	15
Interferometría de imágenes de radar .....	15
Necesidad de ajustar y validar los MDE .....	15
Objetivo de esta tesis .....	17
Contribuciones de esta tesis.....	17
Publicaciones y presentaciones a congresos.....	18
Publicaciones en Revistas Indexadas .....	18
Publicaciones en Colecciones Periódicas .....	18
Presentaciones a Congresos Internacionales .....	18
Presentaciones a Congresos Nacionales .....	19
INTERFEROMETRIA DE IMÁGENES DE RADAR.....	20
Introducción.....	20
Radar de Apertura Sintética. Historia y Principio de Funcionamiento. ....	22
Interferometría .....	25
Single Pass Interferometry - Across Track Configuration .....	27
Single Pass Interferometry - Along-Track Configuration .....	28

---

Repeat Pass Interferometry.....	28
Configuración de adquisición.....	29
Sensibilidad en altura.....	31
Decorrelación entre imágenes.....	33
Decorrelación geométrica.....	33
Decorrelación temporal.....	34
Grado de Coherencia.....	35
Influencia de la atmósfera.....	36
Análisis de sensibilidad de los errores sobre las cotas calculadas.....	37
Importancia de los errores.....	41
AJUSTE DEL MDE EN BASE A PUNTOS CONFIABLES.....	42
Introducción.....	42
Transformaciones Rígidas.....	44
Desplazamiento en $z$ .....	44
Inclinación.....	45
Desplazamiento en el plano $xy$ .....	45
Deformaciones.....	46
Deformación Lineal.....	47
Deformaciones Puntuales.....	51
ESTUDIO DE CASOS DE APLICACIÓN.....	54
MDE Chubut.....	54
Ubicación geográfica del área.....	54
Características fisiográficas.....	55
Información Utilizada.....	56
Procesamiento interferométrico.....	57
Conjunto de datos de corrección y validación.....	58
Unión y corrección de los MDEs.....	59
Análisis de la evolución de los errores.....	65
Sumario del ejemplo.....	74
MDE Azul.....	74
Ubicación geográfica del área.....	74
Características fisiográficas.....	75
Utilización del MDE.....	76
Información utilizada.....	76
Imágenes de radar.....	76
MDE IGM.....	78
Datos de campo.....	78
Corrección y Ajuste.....	80
Análisis de los errores.....	81
Sumario del ejemplo.....	84
Conclusión.....	86
CONCLUSIONES.....	87
Utilización de los MDEs ejemplo presentados en el capítulo IV.....	89
Software generado.....	92
Recomendaciones y trabajo a futuro.....	92
Referencias.....	94
CURRÍCULUM VITAE.....	97
PUBLICACIONES CON REFERATO.....	105

## TABLA DE ILUSTRACIONES

Figura 1.1 Representación esquemática de un Modelo Digital de Elevación. ....	11
Figura 1.2 A) MDE construido mediante interpolación de cartas topográficas. B) MDE construido mediante técnicas más precisas. ....	12
Figura 1.3 Geometría de adquisición de imágenes estereoscópicas. ....	14
Figura 1.4 Geometría de adquisición interferométrica. ....	16
Figura 2.1 Espectro electromagnético .....	21
Figura 2.2 Geometría de adquisición del radar. ....	23
Figura 2.3 Esquema de funcionamiento del SAR. ....	24
Figura 2.4 Experimento de la doble rendija de Young. ....	26
Figura 2.5 Localización de franjas brillantes y oscuras en el experimento de Young. ....	26
Figura 2.6 A) Patrón de interferencia sobre la tierra plana. B) Patrón de interferencia sobre una topografía determinada. ....	27
Figura 2.7 Configuración de adquisición de imágenes radar para interferometría. ....	28
Figura 2.8 Geometría de un sistema interferométrico. ....	30
Figura 2.9 Relación entre la configuración de adquisición y la cota topográfica (q). ....	31
Figura 2.10 Extracto de un interferograma real. ....	32
Figura 2.11 Fase enrollada resultante de la modelación de una superficie cónica. ....	33
Figura 2.12 Variación en los ángulos de incidencia locales para dos situaciones con diferente línea de base. ....	34
Figura 2.13 Relación entre la desviación estándar de la fase, la correlación y el número de looks. ....	36
Figura 2.14 Influencia del error de fase en las cotas calculadas. ....	38

Figura 2.16 Influencia del desconocimiento de la línea de base en el error relativo en cota.....	40
Figura 2.17 Influencia de las variables atmosféricas Humedad Relativa y Presión sobre la fase interferométrica. ....	41
Figura 3.1 Plano más textura. Visualización en planta y tridimensional. ....	43
Figura 3.2 Paraboloide más textura. Visualización en planta y corte. ....	43
Figura 3.3 Sistema coordenado utilizado para el planteo de la corrección de MDEs. ....	44
Figura 3.4 A) Esquema de desplazamiento rígido en z, B) Esquema de inclinación. ....	45
Figura 3.5 Superficie típica de error rms. ....	46
Figura 3.6 A) Triangulación ejemplo construida a partir de un conjunto de 5 puntos, B) Visualización tridimensional de la triangulación. ....	49
Figura 3.7 Comportamiento de la coordenada z de los puntos de control durante la aplicación del filtro. ....	49
Figura 3.8 Errores posteriores a la corrección con diferentes espaciamientos de la grilla. ....	50
Figura 3.9 Superficie de corrección obtenida para el ejemplo sintético. ....	51
Figura 3.10 Superficie de corrección puntual para un caso típico. ....	53
Figura 4.1 Zona de interés Gan Gan – Cañadón Asfalto. Ubicación dentro de la Provincia del Chubut. ....	55
Figura 4.2 Rasgos principales de la zona Gan Gan – Cañadón Asfalto identificados sobre una imagen Landsat 7 pancromática. ....	56
Figura 4.3 Cobertura de las imágenes de radar. ....	56
Figura 4.4 MDEs provenientes de los cuatro pares interferométricos utilizados para cubrir la zona de interés en su totalidad. ....	58
Figura 4.5 Distribución de puntos de control sobre el Área de Interés. ....	58
Figura 4.6 Traza de perfiles extraídos sobre las zonas de unión de las diferentes partes que componen el MDE Chubut final. ....	60
Figura 4.7 Evolución de los errores en la zona de superposición entre las partes del MDE denominadas 110-4473 y 110-4455. ....	61
Figura 4.8 Evolución de los errores en la zona de superposición entre las partes del MDE denominadas 339-4473 y 339-4455. ....	62
Figura 4.9 Evolución de los errores en la zona de superposición entre las dos pasadas denominadas 110 y 339. ....	64
Figura 4.10 Zonas de superposición entre los distintos componentes del MDE. ....	65
Figura 4.11 Evolución de los errores sobre zonas del MDE. ....	68
Figura 4.12 Evolución de los errores sobre zonas del MDE. ....	69
Figura 4.13 Evolución de los errores sobre zonas del MDE. ....	70
Figura 4.14 Errores sobre partes del MDE. ....	71
Figura 4.15 Representación sobre el MDE de tres perfiles medidos en campo. ....	73
Figura 4.16 Cuenca del Arroyo del Azul. Ubicación sobre el mapa de la Provincia de Buenos Aires. ....	75
Figura 4.17 Cobertura de los pares interferométricos (amarillo) sobre el Área de Interés. ....	77
Figura 4.18 A) Puntos Fijos Topográficos, B) Red de Alta Precisión de la Provincia de Buenos Aires, C) Pozos de medición del IHLLA. ....	78
Figura 4.19 Comparación entre el interferograma antes (A) y después (B) de ser filtrado. ....	79
Figura 4.20 A) Interferograma correspondiente a la Cuenca del Azul, afectado por un error en la estimación de la línea de base. B) El mismo interferograma construido con un valor más preciso de línea de base. ....	79

Figura 4.21 Evolución de los errores sobre zonas del MDE Azul. ....	83
Figura 4.22 Distribución de los errores sobre el MDE Azul completo. ....	84
Figura 4.23 A,B,C) Perfil extraído de una zona del MDE Azul; se muestra su traza sobre una imagen Landsat, sobre el MDE y el perfil en sí, respectivamente. D,E) Vista tridimensional y en planta de la zona de la aeródromo de Azul.....	85
Figura 5.1 Un instante de la simulación de inundación realizada con el modelo ACQUA sobre el MDE Azul.....	90
Figura 5.2 Comparación entre la simulación del escurrimiento sobre el MDE interferométrico corregido (A), el MDE IGM (B) y una carta típica de inundación (C). ....	91
Figura 5.3 Resultados de la simulación en un punto de la subcuenca Santa Catalina....	91

## **LISTA DE TABLAS**

Longitudes de onda usadas en radar de imágenes .....	22
Características de algunos radares existentes y proyectados.....	22
Características del SAOCOM.....	24
Línea de base crítica para distintos sistemas de radar .....	34
Resultados del experimento de corrección para distintoespaciamento de puntos de corrección .....	50
Imágenes SAR utilizadas para construir el MDE Chubut .....	57
Errores sobre el MDE Chubut .....	67
Imágenes SAR utilizadas para construir el MDE Azul .....	77
Parámetros de los pares interferométricos del MDE Azul .....	80
Evolución de los errores del MDE Azul.....	82

## Abstract

This work presents a Digital Elevation Models correction method, based in ground control points. Chapter I presents the fundamentals of DEM, the different ways of construct them and how they are used nowadays. Problems affecting them and the importance of correct them is also addressed. Chapter II analyzes with detail Synthetic Aperture Radar Interferometry, the technique used to construct DEMs in this thesis. In its end, several simulations on SAOCOM (the argentinian projected SAR satellite) modes are carried out in order to evaluate the relative importance of error sources in interferometry. In Chapter III, the correction methods fundamentals are described. The method comprises: 1) the application of rigid shifts which minimize misfit to the data in a least squares sense, both in xy and in z directions, and 2) the application of deformations to correct regional and localized errors. Regional deformation is achieved using a piece-wise linear interpolation, while localized errors are corrected solving a Laplace equation. Chapter IV analyzes two real cases, a DEM of Gan Gan – Cañadón Asfalto (Chubut Province) and another of Azul creek basin (Buenos Aires Province), each one of them presenting different kind of difficulties. The interferometric construction process is described and the correction techniques of chapter IV are applied. Finally, Chapter V shows conclusions and usage of the cases presented previously. Future trends and research development are also addressed.

## Resumen

En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología que, basada en una serie de transformaciones, permite corregir Modelos Digitales de Elevación a partir de un conjunto de mediciones en el terreno consideradas como puntos seguros. El capítulo I presenta algunos conceptos fundamentales relacionados con la importancia de los MDE en la actualidad y con las diversas maneras de construirlos. Allí también se describe la problemática que afecta a los mismos y se explica por qué es preciso corregirlos. El capítulo II hace un análisis detallado de la técnica denominada interferometría de imágenes de radar, que ha sido utilizada para construir los MDE sobre los que se ha trabajado en esta tesis. Al final del capítulo se evalúa la importancia relativa de las diversas fuentes de error mediante simulaciones hechas para uno de los modos del satélite argentino proyectado SAOCOM. En el capítulo III se presentan los fundamentos de las técnicas de corrección desarrolladas. En primer lugar se analizan movimientos e inclinaciones rígidas del modelo en las direcciones cartesianas de forma de minimizar el error cuadrático medio en los puntos seguros. A continuación se proponen dos tipos de transformaciones, una que genera deformaciones sobre grandes extensiones y otra para un ajuste puntual. El capítulo IV está dedicado al análisis de dos casos reales, un MDE de la región Gan Gan – Cañadón Asfalto (Pcia. del Chubut) y otro de la cuenca del arroyo del Azul (Pcia. de Buenos Aires), que presentan diversas problemáticas. Se describe todo el proceso de construcción de los modelos mediante interferometría y la corrección con las técnicas desarrolladas. Para finalizar, el capítulo V muestra las conclusiones y la utilización actual de los ejemplos reales presentados en el capítulo anterior. También quedan planteados los pasos a dar para mejorar los resultados obtenidos y el desarrollo futuro de la investigación.

# 1

## INTRODUCCION

### **Motivación**

Desde la antigüedad el hombre ha tratado de representar más o menos fielmente el medio en que vive. Esto le permitía conocer detalladamente el territorio de su propiedad, sus puntos débiles y las zonas donde podía hacerse fuerte para defenderlo de los ataques de sus enemigos. También era posible, en base a este conocimiento, planificar desplazamientos y la construcción de grandes obras de mejoramiento de las condiciones de vida, tales como acueductos, grandes vías, etc.

Durante períodos de la edad moderna grandes campañas se realizaron con el objeto de extender los límites de la tierra conocida para conquistar y utilizar las riquezas de las llamadas Indias Occidentales. Estos esfuerzos fueron acompañados por la construcción masiva de mapas de los territorios descubiertos, que permitieron a los navegantes llegar nuevamente a los mismos lugares que sus antecesores. Dichos mapas fueron haciéndose cada vez más precisos, en la medida en que nuevos instrumentos de navegación eran utilizados. Un hito fundamental en la historia de la navegación fue la invención del cronómetro, que permitió exactitudes inusitadas en la ubicación en longitud.

Por otra parte, además de existir océanos y continentes, existen montañas y valles. Es importante también, de alguna manera, relevar los cambios de altura entre distintos puntos. En principio es posible, tomando un punto determinado como nivel de referencia, medir la diferencia de cota entre puntos formando una poligonal. Extendiendo este trabajo a lo largo de polígonos cerrados se puede obtener una buena idea de la topografía. Qué tan buena dependerá de la densidad de puntos que se releven. En la medida en que las necesidades de precisión aumenten será necesario tomar más puntos y con mayor densidad.

En particular, descripciones de la topografía cada vez más detalladas y precisas son un requerimiento creciente de la comunidad científica y empresaria relacionadas con las llamadas ciencias de la tierra. Algunas aplicaciones pueden ser resueltas con los mapas de curvas de nivel existentes, construidos a partir de mediciones realizadas en el terreno, pero en muchos casos es necesario mayor resolución, y el conocimiento detallado de la topografía entre curvas de nivel es de fundamental importancia. Estos requerimientos están directamente relacionados con la disponibilidad de computadoras, en las cuales es posible ejecutar modelos altamente sofisticados y que requieren tratamiento numérico de la topografía. Como ejemplo de todo esto pueden citarse modelación de inundaciones y de flujos de lava, modelos de dispersión atmosférica aplicados a distintos contaminantes, donde la topografía y rugosidad del terreno juegan un rol fundamental, planeamiento de trazados de distinto tipo, tales como ductos, caminos, etc., diseño de redes de telecomunicaciones.

### ¿Qué es un Modelo Digital de Elevación?

Como respuesta a estos requerimientos aparece el concepto de Modelo Digital de Elevación (MDE), que consiste en una “estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno”[1]. En la práctica el MDE está constituido por una grilla georreferenciada donde cada elemento (o celda) contiene un valor de cota topográfica. A su vez, cada elemento de la grilla lleva asociado un par de coordenadas que se corresponde con un sistema de representación terrestre (por ej. Geográficas o Gauss Kruger). De esta manera, el MDE constituye una representación más o menos fiel de una determinada porción de la superficie terrestre. Mientras más densa sea esta grilla, mayor nivel de detalle estará representado mediante el MDE.

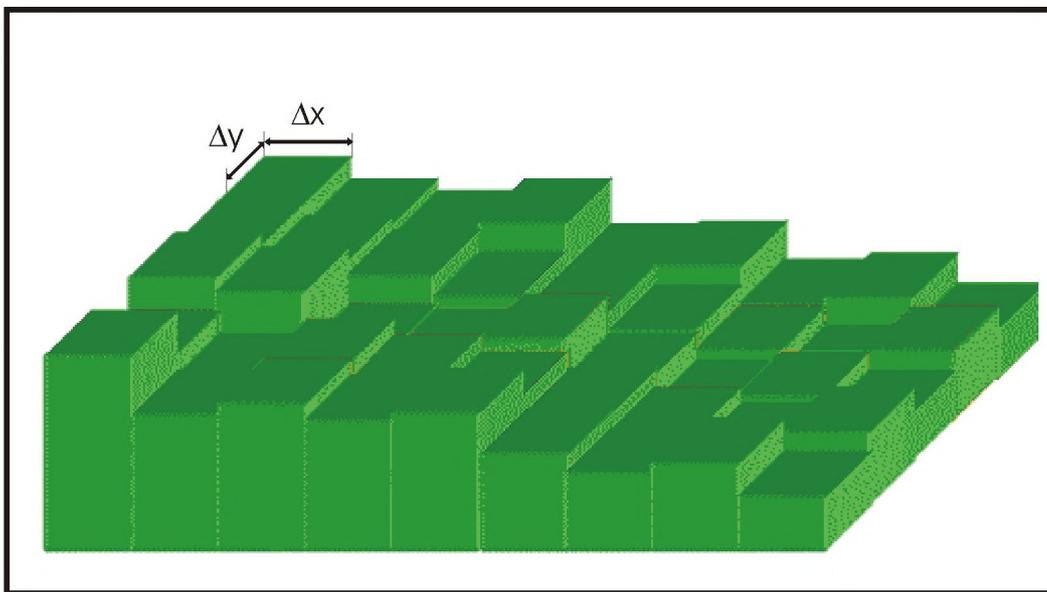


Figura 1.1 Representación esquemática de un Modelo Digital de Elevación.

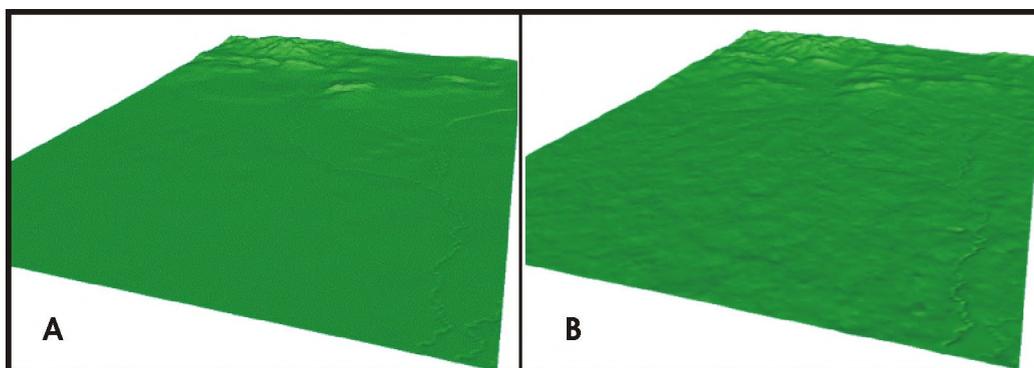
## Métodos utilizados para construir un MDE

En principio, es posible clasificar las técnicas de construcción de MDEs según la metodología adoptada para llevar a cabo el relevamiento de la información. Tal relevamiento puede hacerse de forma directa en el terreno, mediante instrumentos tales como teodolitos o GPS, o indirectamente por medio de sensores remotos (instrumental a bordo de aviones o satélites).

### Relevamientos a partir de mediciones directas

Existe gran cantidad de información de topografía recolectada por medio de mediciones directas. La misma se halla compilada en forma sistemática y a distintas escalas en cartas y mapas en forma de curvas de nivel y puntos acotados.

Es, entonces, posible tomar la información de estos relevamientos y transformarla en un MDE mediante la digitalización de las curvas de nivel y puntos acotados y la constitución de TINs (Triangulated Irregular Networks). Es posible utilizar otras técnicas de interpolación, tales como kriging[2]. De todos modos es muy difícil que la topografía real pueda ser representada fielmente en la zona interpolada, por más sofisticada que sea la técnica de interpolación utilizada[1]. De esta manera, los rasgos de la topografía que no hayan sido capturados por las curvas de nivel y puntos originales, en general no quedarán representados en el MDE obtenido (figura 1.2).



*Figura 1.2 A) MDE construido mediante interpolación de cartas topográficas. B) MDE construido mediante técnicas más precisas. Puede observarse cómo el primero no representa detalles relevantes de la rugosidad del terreno.*

Otra posibilidad es la de realizar un relevamiento o densificación de la información existente en la zona de interés mediante mediciones directas. Esto es, ir al campo y medir una grilla tan densa como se quiera mediante técnicas de nivelación o GPS[3]. Mediante la utilización de técnicas de GPS diferencial es posible medir con gran precisión posiciones y cotas. Utilizando equipamiento suficientemente preciso (ej. GPS geodésicos) no es necesario permanecer largo tiempo en cada punto para obtener posicionamiento en tres dimensiones con bajos niveles de error. Mediante las técnicas más modernas es posible alcanzar precisión de menos de 1cm en el plano y de pocos centímetros en cota[4].

Puede notarse fácilmente que los costos de esta forma de operación pueden hacerse prohibitivos aún para grillados no demasiado densos. Además, aunque los costos no fueran un problema, existen zonas de difícil o peligroso acceso, o directamente inaccesibles de la manera necesaria para extender una malla densa de mediciones. Piénsese en zonas con densa cobertura vegetal (ej, zona boscosa de Tucumán y Salta) donde sería imposible tener recepción de GPS debajo de los árboles y donde tampoco podría utilizarse un teodolito ya que no se vería un punto alejado unos pocos metros; o zonas cordilleranas muy escarpadas donde no podría directamente accederse.

## **Relevamientos a partir de mediciones indirectas**

Frente a los inconvenientes que hacen prácticamente imposible los relevamientos densos mediante mediciones directas, los sensores remotos tienen varias ventajas. La primera de ellas radica en que no es necesario acceder directamente al sitio de medición, sino que el mismo es observado desde una cierta distancia, ya sea que la cámara esté montada en un avión o en un satélite. De esta manera queda en principio superada la imposibilidad que plantea la inaccesibilidad de una región determinada. Además, la densidad de la información obtenida está directamente relacionada con la resolución espacial de la cámara utilizada. En la actualidad existen cámaras ópticas comerciales a bordo de satélite que proveen una resolución de 1m en tierra[5][6], con lo cual el problema de densidad de mediciones está claramente superado.

Sin embargo, hay otro tipo de problemas que afectan a las mediciones realizadas desde el aire o desde el espacio. Sin entrar en mucho detalle, es necesario mencionar problemas de distorsión por actitud de la plataforma (avión o satélite), influencia de los parámetros de la atmósfera, deformación introducida por la geometría de observación, etc.

Entre los llamados sensores remotos, existen varios instrumentos cuya información puede ser aprovechada para relevar topografía. Asimismo, se han utilizado distintas técnicas, tales como estereoscopía óptica, radargrametría e interferometría. A continuación se hará un breve reseña de cada una de ellas. En el Capítulo II se hará una descripción detallada de la utilización de interferometría de imágenes de radar, ya que sobre esta técnica se ha realizado la presente tesis.

## **Estereoscopía óptica**

Una de las técnicas más utilizadas para construir MDEs es la estereoscopía óptica[7][8][9]. Los fundamentos de la técnica son los mismos que permiten la visión estereoscópica del ser humano. Un objeto es observado simultáneamente desde puntos de vista diferentes (cada ojo), y dos imágenes de lo observado se constituyen en el cerebro. Cada imagen difiere de la otra debido a la geometría de observación y a la distancia a la que se hallan los objetos de los ojos. Estas diferencias entre ambas imágenes son las que permiten que la persona note las diferencias de profundidad entre objetos situados a diferente distancia del observador.

De manera similar, es posible construir una geometría de observación estereoscópica mediante cámaras ópticas montadas en aviones o satélites. Para ello es necesario

observar una zona desde posiciones (y con ángulos) diferentes, tal como se muestra en la figura 1.3. Allí puede verse cómo los puntos  $P_1$  y  $P_2$  aparecen en cada toma en diferente posición relativa al centro de la imagen. El valor de este desplazamiento (denominado paralaje) está relacionado con la cota del punto observado y por lo tanto puede ser utilizado para calcularla. La ecuación 1 expresa la relación existente entre paralaje y cota.

$$par_{P_1} = \frac{f \cdot B}{H - h_{P_1}}, \quad par_{P_2} = \frac{f \cdot B}{H - h_{P_2}} \quad (1)$$

Esta técnica ha sido aplicada extensivamente utilizando fotografía aérea como imágenes base. También ha sido empleada para obtener MDEs de imágenes satelitales, destacándose por su precisión y calidad las imágenes de los satélites SPOT[10] y ASTER[11]. De menor resolución son los resultados obtenidos mediante estereoscopia Landsat, realizada sobre las zonas de superposición de pasadas contiguas. Actualmente es posible realizar este tratamiento a imágenes de muy elevada resolución (entre 1 y 2m para los satélites EROS[5] e IKONOS[6]), pero en zonas pequeñas y a costos relativamente elevados.

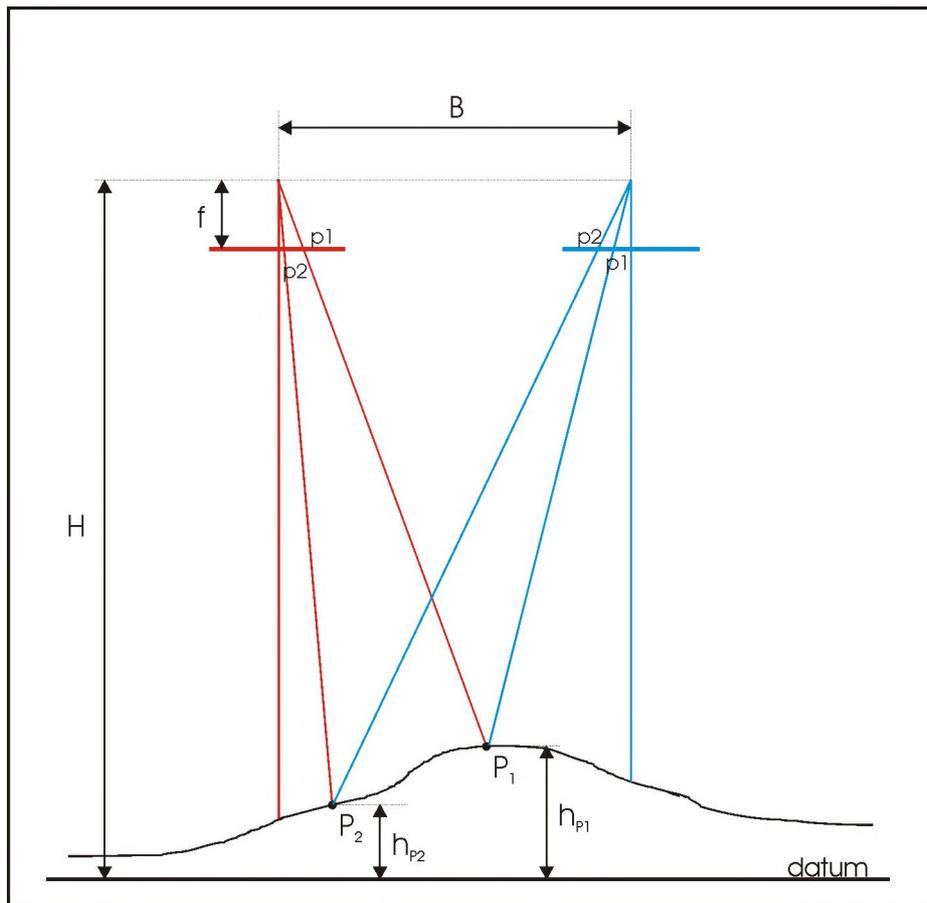


Figura 1.3 Geometría de adquisición de imágenes estereoscópicas<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Figura extraída de Wolf [9]

## **Radargrametría**

El término radargrametría[12] alude a la utilización de imágenes de radar con configuración estereoscópica para reconstruir topografía. El principio de funcionamiento del método es el mismo descrito en el párrafo dedicado a estereoscopia óptica.

Sin embargo, el hecho de utilizar imágenes de radar introduce algunos problemas que hay que tener en cuenta. El más importante de ellos es que la iluminación de una imagen de radar cambia muy rápidamente con el ángulo de incidencia. Además, para tener una geometría estereoscópica buena, se necesita que los ángulos de incidencia de ambas imágenes sean bastante diferentes. Esto introduce la necesidad de llegar a una solución de compromiso, ya que a muy distintos ángulos de incidencia es muy pobre la identificación de rasgos homólogos en ambas imágenes.

Otro problema proviene del elevado nivel de ruido que es inherente a la iluminación radar (denominado *speckle*)[13].

## **Interferometría de imágenes de radar**

Mediante esta técnica el cálculo de la topografía se hace a partir de la relación existente entre la fase de la señal registrada y la distancia sensor-objetivo. El enfoque de una única imagen de radar permite resolver la posición de un elemento en coordenadas xy, permaneciendo una ambigüedad en la resolución de la coordenada z. Esta ambigüedad es resuelta mediante la utilización de una segunda imagen tomada con geometría similar. De esta manera es posible conocer la posición de un objeto determinado, incluyendo coordenadas geográficas y altura topográfica. La Figura 1.4 de la página siguiente muestra la configuración de adquisición de imágenes interferométricas.

No se dan más detalles de esta metodología acá, debido a que la misma está detalladamente descrita en el capítulo II de esta tesis.

## **Necesidad de ajustar y validar los MDE**

La construcción de MDEs a partir de información recolectada por sensores remotos lleva asociada una serie de etapas, durante las cuales se introducen, o pueden introducirse, errores de distinta naturaleza. Si no son eliminados de antemano, dichos errores van a propagarse a través del proceso y van a afectar al producto final. En muchos casos es difícil eliminar estos errores de antemano y sólo resta convivir con ellos, tratando de que no afecten al producto final a tal punto de hacerlo inservible.

Las etapas involucradas en el procesamiento pueden resumirse con generalidad de la siguiente manera: 1) Adquisición de los datos, 2) Transmisión de datos a tierra, 3) Procesamiento realizado para constituir las imágenes y correcciones de distinta naturaleza, 4) Procesamiento específico de los datos para constituir el MDE. Cada una de las etapas mencionadas[14] lleva asociadas fuentes de error, tales como:

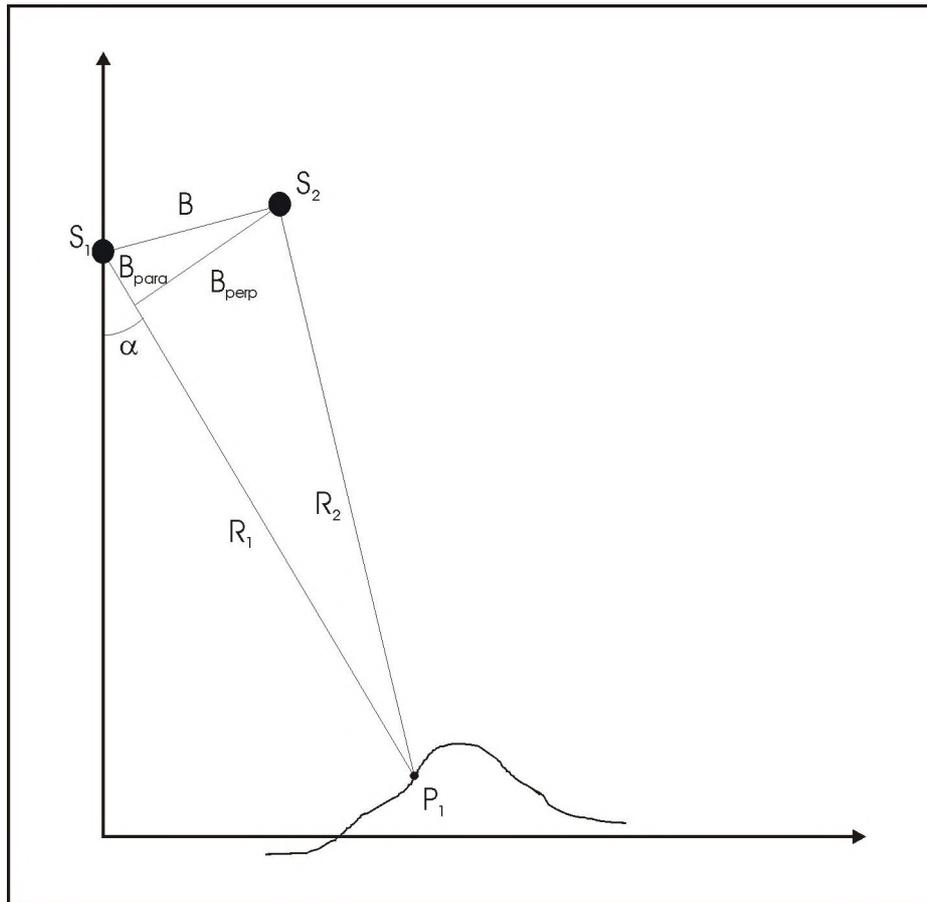


Figura 1.4 Geometría de adquisición interferométrica.  $S_1$  y  $S_2$  son las posiciones del radar al momento de tomar ambas imágenes. Las distancias  $R_1$  y  $R_2$  pueden traducirse en fases, mediante las cuales calcular la altura topográfica del punto  $P_1$ .

1. Deformaciones de la lente o cámara, actitud de la plataforma, influencia de la atmósfera. Deformación debida a la topografía.
2. Pérdida de datos en la transmisión a tierra.
3. Defectos en los algoritmos de corrección radiométrica. Deficiencia de enfoque en las imágenes de radar.
4. Fallas específicas de cada método en la fase de construcción del MDE.

Debido a lo expuesto, es necesario validar todo MDE construido a partir de información obtenida de sensores remotos. La manera más segura de hacerlo es utilizando información de topografía extraída de otra fuente suficientemente confiable. Llegado el caso, será necesario utilizar esta información complementaria para corregir el MDE.

Es necesario destacar que el nivel de precisión requerido en el MDE finalmente construido dependerá directamente de la aplicación en la que será utilizado. No obstante esto, la práctica indica que no hay una técnica de construcción de MDE a partir de sensores remotos que tenga por sí sola resultados lo suficientemente precisos para la mayoría de las aplicaciones. Esta discusión deja clara la importancia de corregir y ajustar los MDE con información proveniente de fuentes externas.

## **Objetivo de esta tesis**

En virtud de lo expuesto puede decirse que el origen del presente trabajo es la necesidad de contar con MDEs de determinada precisión para ciertas aplicaciones concretas. Rápidamente se hizo evidente que construirlos utilizando imágenes satelitales era la manera menos costosa y más efectiva de hacerlo, y resultó de particular interés el uso de interferometría de radar por ser una técnica novedosa y en pleno desarrollo. Rápidamente también se hizo evidente que los resultados alcanzados no eran del todo satisfactorios y se planteó la necesidad de mejorarlos aprovechando la información disponible.

El objetivo de este trabajo es, entonces, diseñar algoritmos que permitan realizar la corrección y ajuste de un MDE, de manera tal de hacerlo útil para determinadas aplicaciones de gran interés en la actualidad.

## **Contribuciones de esta tesis**

Las técnicas de construcción de MDEs a partir de sensores remotos permiten pensar en un sinnúmero de aplicaciones basadas en procesamiento digital de los mismos. Puede decirse que cualquier disciplina científica o actividad económica relacionada con la superficie terrestre o con recursos naturales necesita detallada información de topografía. Es entonces muy alentadora la posibilidad de construir MDEs más detallados y precisos, puesta de manifiesto como nunca antes con el advenimiento de nuevas tecnologías basadas en satélites.

Sin embargo, los errores asociados con la adquisición y procesamiento de los datos necesarios para construirlos introducen errores en el producto final que lo hacen prácticamente inútil para las aplicaciones detalladas. Esta es una gran desventaja de tales métodos, pero afortunadamente existen maneras de afrontar este problema. Una de ellas es la propuesta en el presente trabajo.

Entonces, esta tesis contribuye en el área de corrección y ajuste de MDEs mediante conjuntos de puntos obtenidos en forma independiente. Estos últimos pueden provenir de fuentes diversas, tales como mediciones dispersas realizadas sobre el terreno o de otros modelos de elevación de diferente resolución.

Concretamente se propone una técnica de interpolación y filtrado del MDE con los puntos externos que permite reducir los errores que lo afectan. El diseño de la misma ha sido pensado y realiza toda su potencialidad para el ajuste de MDEs obtenidos mediante interferometría de imágenes de radar, pero la misma puede ser aplicada a MDEs obtenidos de manera diferente.

La metodología diseñada ha sido aplicada en numerosos casos de interés real. En el capítulo IV de esta tesis se describen los resultados obtenidos en dos aplicaciones de naturaleza diferente. La primera de ellas es un MDE de la cuenca del arroyo del Azul, en la Provincia de Buenos Aires, que está siendo utilizado para hacer simulación de

inundaciones. La segunda aplicación es un MDE del área Gan Gan – Cañadón Asfalto, en la provincia del Chubut, y está siendo utilizada para planeamiento de campañas de gravimetría y trabajo de campo en prospección petrolera.

## **Publicaciones y presentaciones a congresos**

El trabajo de investigación y desarrollos realizados como motivo de esta tesis fueron divulgados en publicaciones y congresos de difusión internacional. Se resumen a continuación los trabajos generados

### **Publicaciones en Revistas Indexadas**

Euillades, P., Vénere, M., “*Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros*”, Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol 19, N°1, Barcelona, paginas 33-44, 2003.

### **Publicaciones en Colecciones Periódicas**

Euillades, P., Blanco, M., Bonfils, V, Vénere, M., “*Ajuste de Modelos de Elevación del Terreno Mediante Puntos Medidos en el Terreno*”, Mecánica Computacional, Vol XIX, 2000

Euillades P., Vénere M., Clausse A., Vives L., Varni M., Usunoff E., “*Modelos Digitales de Elevación para Simulación Computacional de Inundaciones: Interferometría vs. Cartografía*”, Mecánica Computacional, Vol XXI, 2002

### **Presentaciones a Congresos Internacionales**

Euillades, P., Vénere, M., “*Interferometric Digital Elevation Model of Mendoza Province*”, 29<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment, Buenos Aires, April 8 – 12, 2002

Euillades, P., Vénere, M., “*Corrección de Modelos Digitales de Elevación basada en la utilización de una red de puntos medidos en el terreno*”, II Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Guanajuato, 17-19 de enero de 2002

Blanco, M. Bonfils, V., Euillades, P., “*Modelo Topográfico de los Yacimientos Chihuido de la Salina Norte, Chihuido de la Salina Sur y El Portón*”, III Workshop Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Puerto Iguazú, 8 al 12 de Mayo de 2000

## **Presentaciones a Congresos Nacionales**

Euillades P., Vénere M., Clause A., Vives L., *"Modelos de Elevación y su Importancia en la Simulación de Inundaciones"*, XIX Congreso Nacional del Agua, Villa Carlos Paz (Córdoba - Argentina), 13 - 16 de Agosto de 2002.

# 2

## **INTERFEROMETRIA DE IMÁGENES DE RADAR**

### **Introducción**

El objetivo de este capítulo es describir más detalladamente la técnica Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), su aplicación en la construcción de modelos de elevación y fundamentalmente analizar las distintas fuentes de error que deterioran su precisión. En primer lugar se explican algunos conceptos relacionados con el funcionamiento de un radar de apertura sintética, que son fundamentales para comprender la discusión posterior. Luego se presentan los fundamentos de la técnica interferométrica, las configuraciones posibles, y por último los errores que afectan a las mediciones y cómo inciden los mismos en el MDE obtenido. Para estudiar la magnitud de dichos errores, se presentan simulaciones realizadas durante el trabajo en la presente tesis con datos del satélite SAOCOM, cuyo lanzamiento está previsto por la CONAE para el año 2005.

La figura 2.1 muestra la radiación transmitida a través de la atmósfera en función de la longitud de onda (o de la frecuencia). Puede observarse que existen numerosas bandas de absorción, en las cuales los gases presentes en la atmósfera (vapor de agua, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) absorben la energía y por lo tanto ésta no es capaz de llegar a la superficie terrestre.

Los sistemas de sensoriamiento remoto cuyo objetivo es observar la superficie terrestre, entonces, están diseñados para funcionar en longitudes de onda no absorbidas por la atmósfera. Distintos tipos de cámaras se utilizan para medir la energía reflejada según a qué porción del espectro electromagnético pertenezca la misma. En la figura 2.1 se grafica el porcentaje de transmisión de energía electromagnética a través de la atmósfera

entre los 0.3  $\mu\text{m}$  y los 80 cm (ultravioleta a microondas). Pueden observarse claramente que las ventanas de absorción son particularmente importantes a lo largo de todo el infrarrojo.

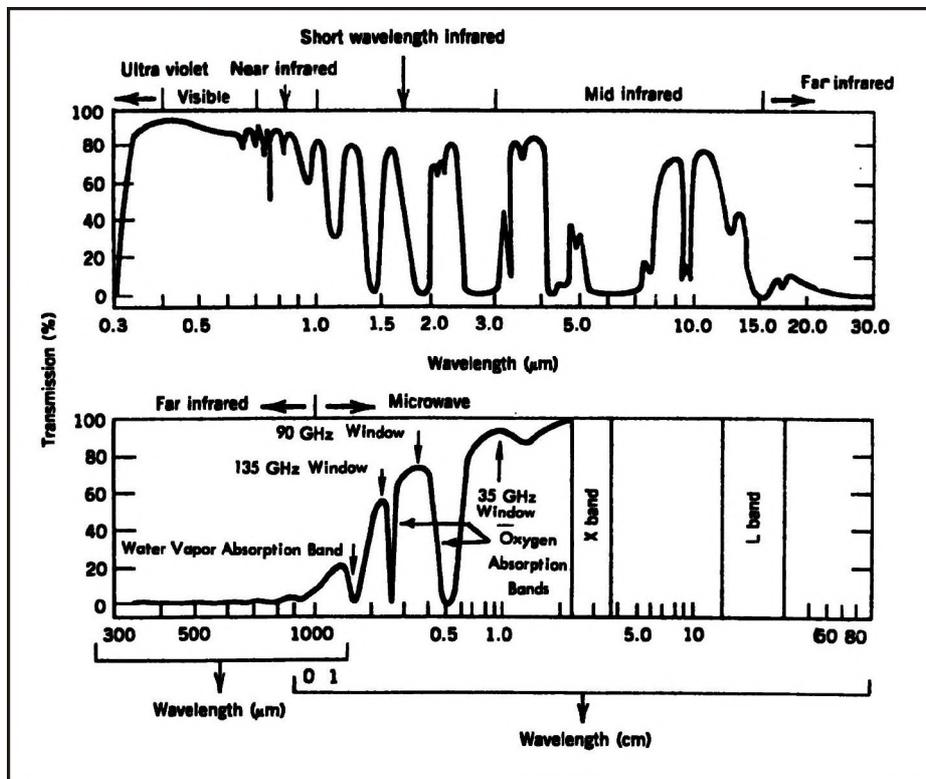


Figura 2.1 Espectro electromagnético<sup>2</sup>

Los sistemas de radar funcionan dentro del dominio de las microondas, que van entre 1 y 300 GHz. Dentro de esta región existen varias ventanas de transmisión en la zona de más elevadas frecuencias, como puede observarse en la figura 2.1. A partir de frecuencias de 10GHz (3cm) y menores la transmisión es prácticamente del 100%. Es en esta última región donde funcionan todos los sistemas de radar de apertura sintética[15].

Dentro del rango de frecuencias mencionado, determinadas longitudes de onda han sido preferidas para el diseño de radares. Las mismas se han codificado con las letras K, Ku, X, C, S, L, y P, correspondientes a las longitudes de onda detalladas en la Tabla 2-I.

En la Tabla 2-II se detallan algunas características de satélites de radar existentes y proyectados. Puede observarse que los satélites operativos hoy en día funcionan en banda C, y con polarizaciones varias. Los más antiguos (ERS, RADARSAT) tienen polarización simple, ya sea VV o HH (la primera letra indica la polarización de la onda emitida y la segunda la de la onda recibida), mientras que la tendencia actual es construir satélites que permitan obtener también las polarizaciones cruzadas.

<sup>2</sup> Figura extraída de Curlander [15]

**TABLA 2-I**  
**LONGITUDES DE ONDA USADAS EN RADAR DE IMÁGENES**

Código	$\lambda$ (cm)	Frecuencia (GHz)
K	1.1 - 1.67	26.5 - 18
Ku	1.67 - 2.4	18 - 12.5
X	2.4 - 3.75	12.5 - 8
C	3.75 - 7.5	8 - 4
S	7.5 - 15	4 - 2
L	15 - 30	2 - 1
P	30 - 100	1 - 0.3

**TABLA 2-II**  
**CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS RADARES EXISTENTES Y PROYECTADOS**

Satélite	Fabricante	Frecuencia	Polarización	Altitud
ERS 1/2	ESA	5.3GHz (5.6cm)	VV	785km
SAOCOM	CONAE (Argentina - proyectado)	1.2GHz (23cm)	full	659km
RADARSAT	Canadá	5.3Ghz (5.6cm)	HH	792km
ENVISAT	ESA	5.3GHz (5.6cm)	quad	800km
JERS	NASDA (Japón – fuera de servicio)	1.2GHz (23cm)	HH	565km

En el caso del satélite ENVISAT, polarización quad quiere decir que es posible tomar imágenes simultáneas de un área en polarización HH y VV, HH y HV o VV y VH con la misma geometría de adquisición[16]. En el caso del satélite SAOCOM, el mismo tendrá la posibilidad de cambiar la polarización de emisión pulso a pulso, y tendrá dos receptores funcionando uno en polarización horizontal y otro en vertical[17].

## **Radar de Apertura Sintética. Historia y Principio de Funcionamiento.**

Antes de hablar del radar de apertura sintética es necesario referirse brevemente al radar de apertura real, también denominado SLAR (*Side-looking Aperture Radar*).

El desarrollo de la herramienta denominada RADAR (*Radio Detection and Ranging*) comenzó en los primeros años del siglo XX, luego de los estudios realizados por Hertz sobre la generación y recepción de ondas electromagnéticas. Estos primeros radares servían para detectar objetos masivos tales como aeroplanos o barcos a grandes distancias y fueron desarrollados con fines bélicos. El radar que permite formar imágenes del terreno observado data de la década de 1950. En esos años se colocó por primera vez una antena en una plataforma aérea y se formaron las primeras imágenes de radar. Este avance permitió que regiones de la tierra habitualmente cubiertas por nubes fueran 'fotografiadas' por primera vez.

La figura 2.2 muestra la configuración simplificada de un SLAR. La antena está apuntada en la dirección perpendicular a la trayectoria del vehículo (avión o satélite) que la transporta y hacia abajo. De esta manera, el radar va recogiendo información del terreno ubicado hacia el costado del vehículo.

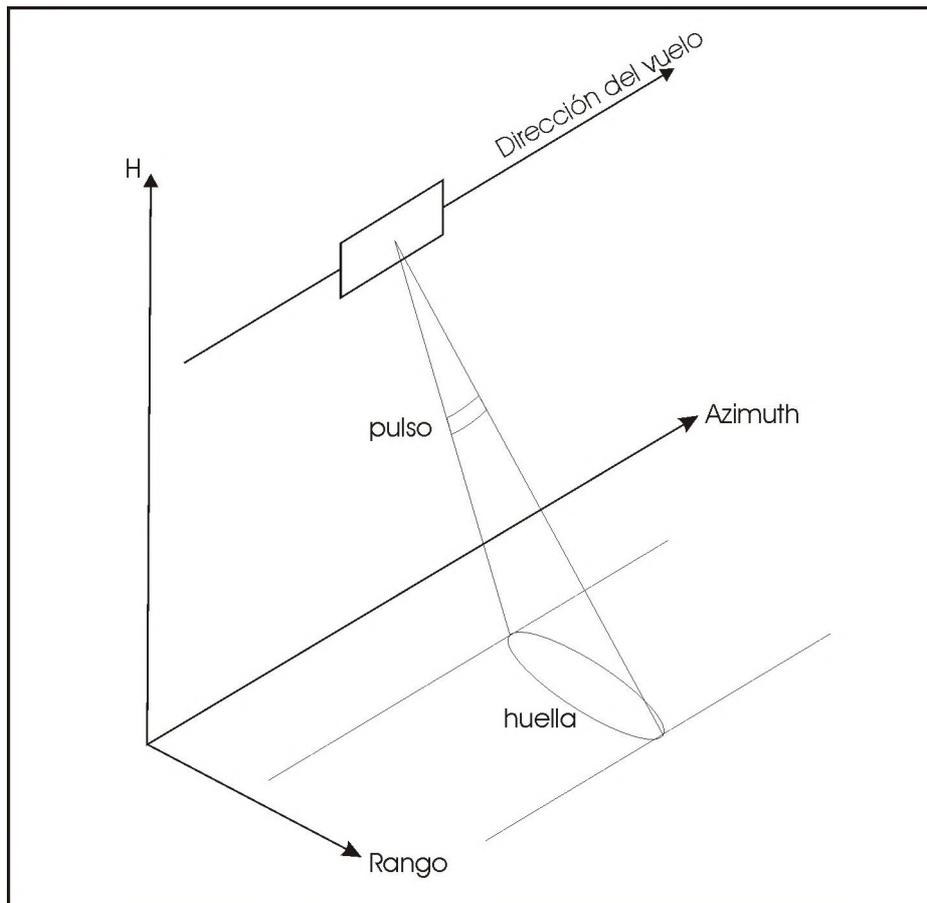


Figura 2.2 Geometría de adquisición del radar.

La misma antena funciona como emisor y como receptor. Mientras el vehículo avanza sobre su trayectoria, el radar alterna la emisión de pulsos de energía electromagnética con períodos de escucha. La frecuencia con que se emiten los pulsos es denominada por su sigla en inglés PRF (*Pulse Repetition Frequency*). Durante el tiempo de escucha, el sistema registra los ecos que han rebotado en la superficie terrestre, cuya amplitud y fase están relacionadas con las características del terreno.

En la dirección perpendicular a la del vuelo (en la literatura esta dirección es referida con la palabra *Range*), el sistema puede resolver dos puntos físicamente separados sobre el terreno si los ecos correspondientes no llegan a la antena al mismo tiempo. Para mejorar la resolución en esta dirección se utilizan técnicas de compresión de pulso [15][18], que permiten una cierta flexibilidad en la elección de la longitud de los mismos.

La dirección paralela al vuelo (*Azimuth*) debe ser tratada de distinta manera. Para que dos puntos puedan ser resueltos, es necesario que los mismos no estén en el área alcanzada por el mismo pulso EM. O sea que para mejorar la resolución se debe afinar el haz; y para lograr esto último es necesario agrandar la antena. Esto plantea el problema tecnológico de desplegar grandes antenas en el espacio (y para obtener resoluciones aceptables serían necesarias antenas de cientos de metros de largo). Un pequeño ejemplo ayudará a aclarar este problema: un satélite como el SAOCOM (proyectado por la CONAE) con las características descriptas en la Tabla 2-III, tendrá

una resolución de aproximadamente 17 km en azimuth y 16 km en rango (si no se aplica compresión de pulso en rango). Esta resolución es claramente insuficiente para la mayoría de las aplicaciones.

TABLA 2-III  
CARACTERÍSTICAS DEL SAOCOM

longitud de onda - $\lambda$	23.5 cm
frecuencia de operación - f	1275 MHz
ancho de banda - B	50 MHz
tamaño de antena - $L_a \times W_a$	10m x 2.5m
duración del pulso	50 $\mu$ s
ángulo de apuntamiento medio - $\theta$	25°
ángulo de incidencia (tierra esférica) - $\phi$	27°
altura de la órbita - H	650 km
Rango - R	725.3 km

Este problema, que hacía impensable el montaje de un radar en un satélite, pudo resolverse gracias a una observación hecha por Wiley (1951). La clave radica en aprovechar el hecho de que, si el haz es amplio, un mismo punto sobre la tierra devuelve ecos dentro de un gran número de pulsos consecutivos (figura 2.3).

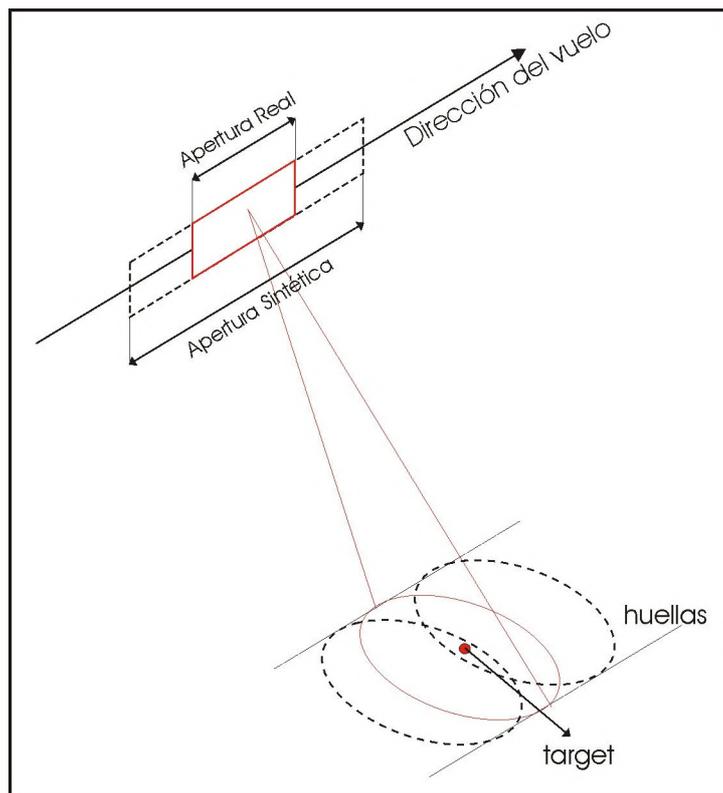


Figura 2.3 Esquema de funcionamiento del SAR. El punto 'target' aparece dentro del haz de la antena cuando la misma se encuentra en tres posiciones sucesivas. Esto permite sintetizar una Apertura Sintética mayor que la Apertura Real de la antena. (Téngase en cuenta que en un SAR verdadero un mismo punto entra en miles de pulsos)

Mediante procesamiento numérico de los pulsos recibidos[15], se identifica la contribución de cada punto dentro de la información registrada a bordo y de esta manera se 'sintetiza' una antena de gran longitud, lo que equivale a reducir la apertura del radar

(afinar el haz en la dirección de azimuth). Este procesamiento tiene como consecuencia directa una drástica mejora en la resolución en azimuth. Este es el principio de funcionamiento del Radar de Apertura Sintética (SAR).

Utilizando los mismos números del ejemplo anterior, pero haciendo compresión de pulso y apertura sintética, la resolución teóricamente alcanzable es de 6m en rango y 5m en azimuth. En la práctica, estos valores son demasiado optimistas, ya que para su cálculo se han hecho algunas simplificaciones y existen otros límites tecnológicos, pero es posible mantener la resolución en el orden de los 10m.

## **Interferometría**

A modo de introducción a la interferometría de radar se ha seguido el desarrollo planteado por Ghiglia[19]. Consideremos en primer lugar el experimento de la doble rendija, realizado por primera vez por Thomas Young (1801)[20]. Este experimento permitió demostrar experimentalmente la naturaleza ondulatoria de la luz.

El arreglo experimental es como el de la figura 2.4. Se coloca una placa perforada con dos rendijas de ancho muy chico, sobre la cual se hace incidir luz proveniente de una fuente coherente. Los haces de luz que atraviesan las rendijas inciden sobre otra placa que funciona como telón de fondo, dando lugar al patrón de interferencia. El mismo consiste en franjas brillantes y oscuras alternadas.

Para cada punto sobre dicho telón, el haz proveniente de una de las rendijas recorre un camino diferente del haz proveniente de la otra rendija. Esto implica que, en cada punto del telón, la luz proveniente de cada rendija estará desfasada una cantidad dependiente de la diferencia de camino recorrido; en los puntos donde llegue en fase se verá una faja de luz y en los puntos donde llegue en oposición de fase se verá una faja oscura. En la figura 2.5 se muestra la ubicación de dos franjas brillantes (A y C) y una franja oscura (B); puede notarse que las franjas brillantes se producen cuando la diferencia de camino es igual a un número entero de longitudes de onda, mientras que los centros de las franjas oscuras se producen cuando dicha diferencia de camino es de  $n + \frac{1}{2}$  longitudes de onda.

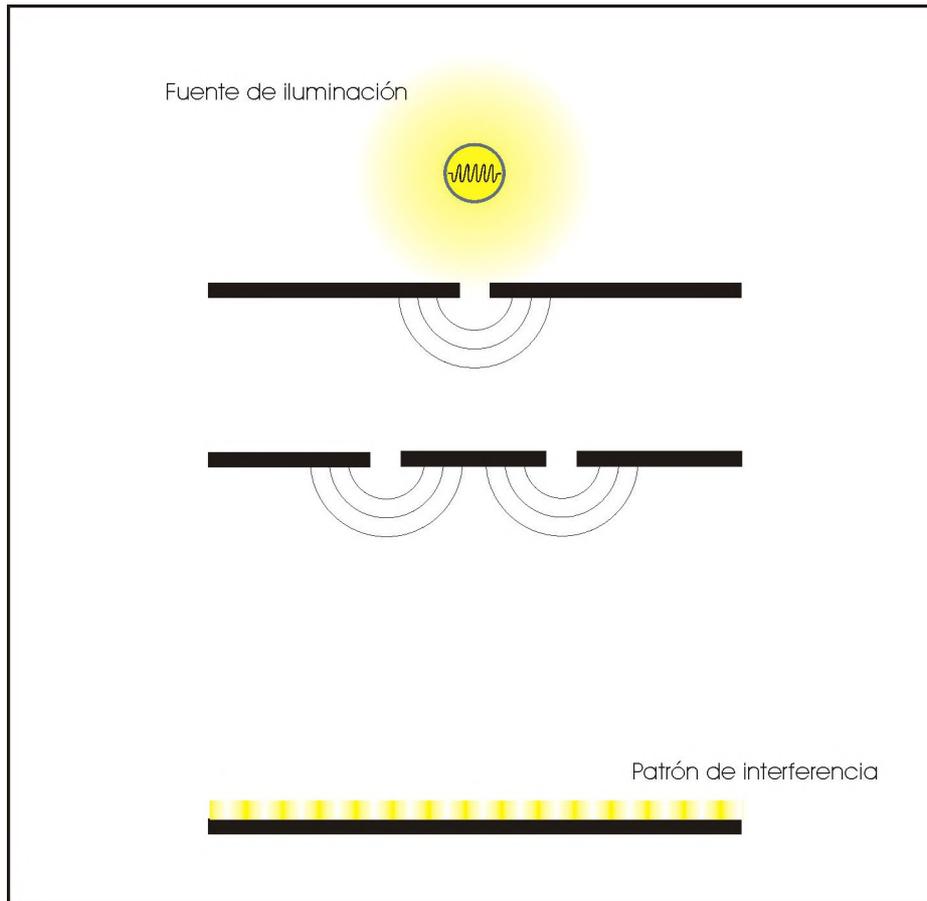


Figura 2.4 Experimento de la doble rendija de Young.

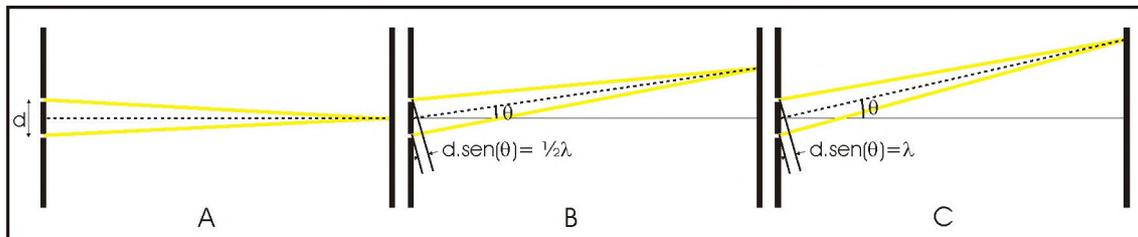


Figura 2.5 Localización de franjas brillantes y oscuras en el experimento de Young. A) La diferencia de camino recorrido por la luz de cada rendija es nula, entonces se produce interferencia constructiva y se produce una franja brillante; B) La diferencia de camino recorrido es igual a media longitud de onda, esto es interferencia destructiva y franja oscura; C) Diferencia de camino igual a la longitud de onda, interferencia constructiva y franja brillante.

Si se modifica el diseño del experimento, de manera de reemplazar las dos rendijas por dos antenas de radar emitiendo haces coherentes, el fenómeno que se produce no cambia sustancialmente (figura 2.6A). Las franjas aparecen ahora curvas porque la interferencia constructiva y destructiva se da a distancias constantes de los emisores.

Hasta aquí, las franjas de interferencia presentan un aspecto uniforme. Esto es debido a que se ha considerado siempre un telón de proyección plano. Si ahora se supone que el telón o pantalla tiene una forma arbitraria, es sencillo notar que el patrón aparecerá

deformado, tal como puede verse en la figura 2.6B. Como la deformación es función de la forma de la pantalla, conociendo la relación es posible calcular ésta a partir de aquella. Más aún, si la pantalla es la superficie terrestre, entonces la forma de la misma es la topografía, y por lo tanto el patrón de interferencia permite calcularla.

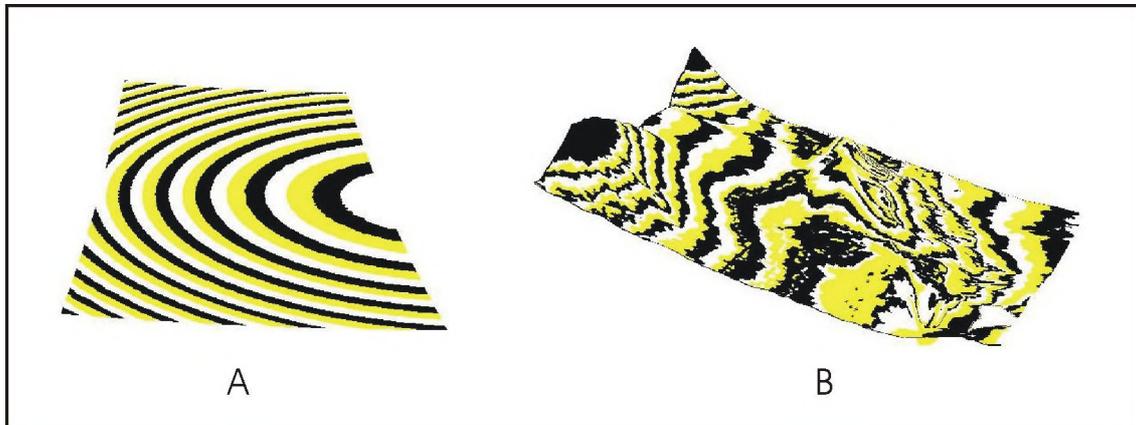


Figura 2.6 A) Patrón de interferencia sobre la tierra plana. B) Patrón de interferencia sobre una topografía determinada.

La discusión anterior se mantiene en un plano intuitivo, de forma de plantear un camino que permita comprender el principio de funcionamiento de la técnica. En la práctica, la construcción de un interferómetro de este tipo se ha resuelto de diferentes maneras debido ya sea a limitaciones tecnológicas o a diversidad de objetivos del sistema. Esto ha dado lugar a tres distintas configuraciones: 1) *Single-Pass Interferometry*, 2) *Repeat-Pass Interferometry*, 3) *Along-Track Interferometry*.

### **Single Pass Interferometry - Across Track Configuration**

Con esta configuración, la adquisición de todos los datos (dos imágenes) se realiza simultáneamente en una sola pasada. Para lograr esto es necesario montar dos sistemas de radar en una única plataforma, razón por la que, históricamente, se ha llevado a cabo desde aviones. Zebker y Goldstein[21] plantean la siguiente configuración: la antena emisora va montada debajo del ala derecha del aeroplano y la energía reflejada desde el suelo es recibida por dicha antena y por otra que va montada debajo del ala izquierda (figura 2.7A). Las antenas están apuntadas en la dirección perpendicular al vuelo del avión.

La única misión con esta configuración sobre una plataforma orbital fue realizada en febrero de 2000, a bordo del Space Shuttle Endeavour[22]. La duración de la misma fue de 11 días. Una de las antenas fue montada sobre el transbordador, mientras que la otra se desplegó en el extremo de un mástil de 60m de longitud. El objetivo de esta misión es el de construir MDEs de aproximadamente el 80% de la corteza terrestre entre los 60°N y 56°S.

La gran ventaja de esta configuración es que no se producen cambios en el terreno entre adquisiciones. Ya se verá más adelante cómo modificaciones en los elementos retrodispersores a nivel del suelo fotografiado pueden producir serios problemas en la aplicación práctica de interferometría. Por otra parte, las plataformas aerotransportadas

se ven afectadas por movimientos (actitud del avión y cambios de altitud de vuelo) que distorsionan los datos, y que deben ser tenidos en cuenta durante el procesamiento[23].

### Single Pass Interferometry - Along-Track Configuration

Dos antenas son montadas en un aeroplano, apuntando en la dirección de vuelo y separadas por una distancia fija en tal dirección. De esta manera la misma zona es tomada por la antena anterior y posterior, y dos imágenes complejas son generadas. Un determinado objetivo es observado por una y otra antena con una separación de tiempo que dependerá de la distancia entre antenas y de la velocidad de la plataforma. Esto puede verse esquemáticamente en la figura 2.7B.

La diferencia de fase es producida por el movimiento del objetivo en la dirección en la que el radar avanza. Esta configuración entonces permite detectar y medir movimientos del objetivo, y es transparente a objetivos estáticos. Se ha documentado su utilización para demostrar el movimiento de corrientes marinas y espectros de olas, ondas de gravedad superficial y coherencia sobre océanos[24][25].

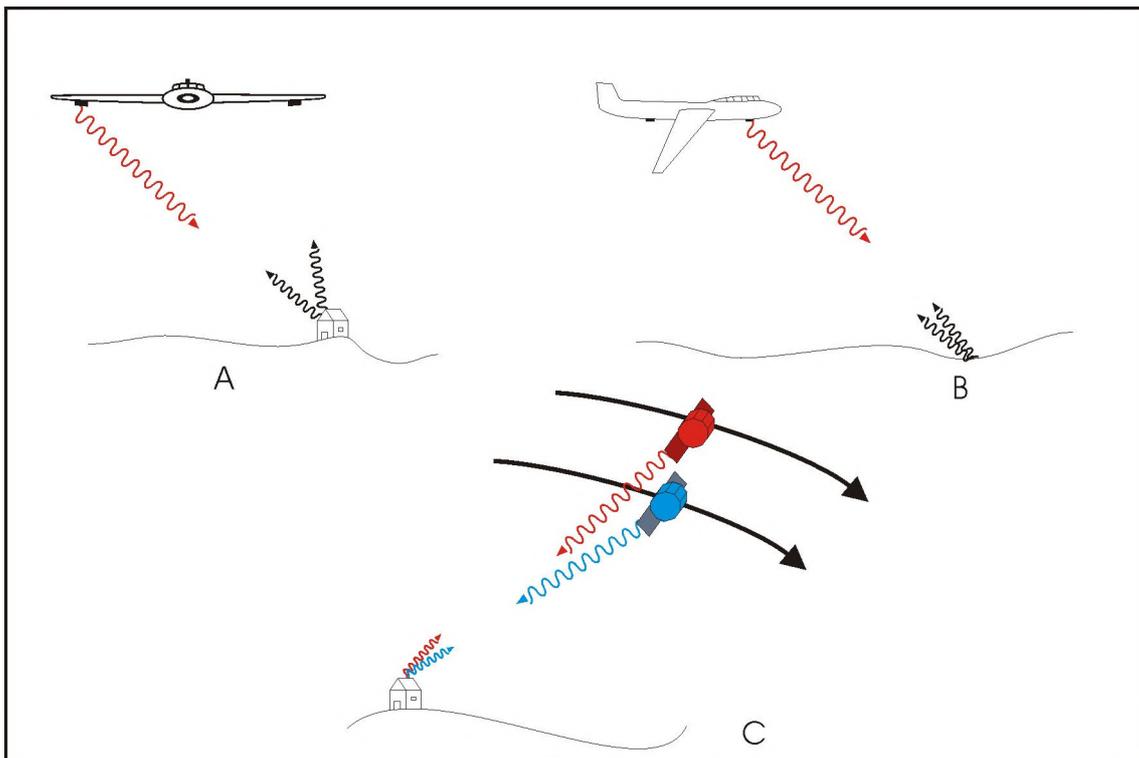


Figura 2.7 Configuración de adquisición de imágenes radar para interferometría. A) Single Pass Across track, B) Single Pass Along Track, C) Repeat Pass

### Repeat Pass Interferometry

Esta configuración está basada en la repetición de tomas del mismo sitio desde una plataforma que porta una única antena (figura 2.7C). Esta particularidad la hace ideal para plataformas satelitales, en las cuales es muy difícil desplegar dos antenas separadas por una línea de base adecuada. Además, se requiere un conocimiento muy preciso de

las trayectorias de la plataformas, lo cual constituye otra característica a favor de las plataformas espaciales. No obstante, se han realizado estudios de *repeat-pass interferometry* mediante aviones[26].

En principio se planteó que la diferencia de fase entre puntos homólogos en un par de imágenes depende solamente de la diferencia de camino recorrido por la energía electromagnética. El hecho de que las adquisiciones se realicen en pasadas distintas de la plataforma genera una serie de efectos que afectan la coherencia entre imágenes y que deben ser tenidos en cuenta.

A partir de este punto, las ecuaciones y desarrollos estarán referidos siempre a esta modalidad (*repeat pass*), aunque los mismos son análogos para la configuración denominada *single pass interferometry*.

## Configuración de adquisición

Para que sea posible reconstruir la topografía mediante un sistema interferométrico, deben cumplirse una serie de condiciones durante la toma de las imágenes. La primera de ellas tiene que ver con la geometría de adquisición, la cual puede adoptar diversas configuraciones, tal como se ha detallado en el párrafo anterior.

La configuración geométrica esquemática de un sistema interferométrico se muestra en la figura 2.8. Las posiciones  $S_1$  y  $S_2$  son las posiciones de la antena en el momento de adquirir cada una de las imágenes, y  $P_1$  es un punto ubicado sobre el terreno.  $R_1$  y  $R_2$  son las distancias entre la antena y el punto que está siendo tomado en ese momento.  $\alpha$  es el ángulo de incidencia y  $B$  es la línea de base (distancia entre los radares en el momento de adquisición de las imágenes). Esta última puede ser descripta por su longitud y su ángulo de inclinación, o descompuesta en dos direcciones: paralela y perpendicular a la línea de visión u horizontal y vertical. En la figura se ha descompuesto en sus componentes paralela y perpendicular a la línea de visión.

La señal electromagnética recorre la distancia  $R_1$  o  $R_2$  entre la antena y el terreno y viceversa, es decir, hace el camino de ida y vuelta. Sabiendo que la señal viaja a la velocidad de la luz ( $c$ ), y registrando el tiempo de emisión de un pulso y su tiempo de retorno, es posible conocer las distancias  $R_1$  y  $R_2$ . Sin embargo, la precisión de este método está asociada a la resolución del radar, que es limitada por el ancho de banda emitido[21]. Hay otra manera de conocer estas distancias: aprovechando el hecho de que es posible obtener amplitudes y fases de los ecos recibidos. La fase de la señal medida en el instrumento (o sea en la imagen) es proporcional a la distancia recorrida, según la ecuación:

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

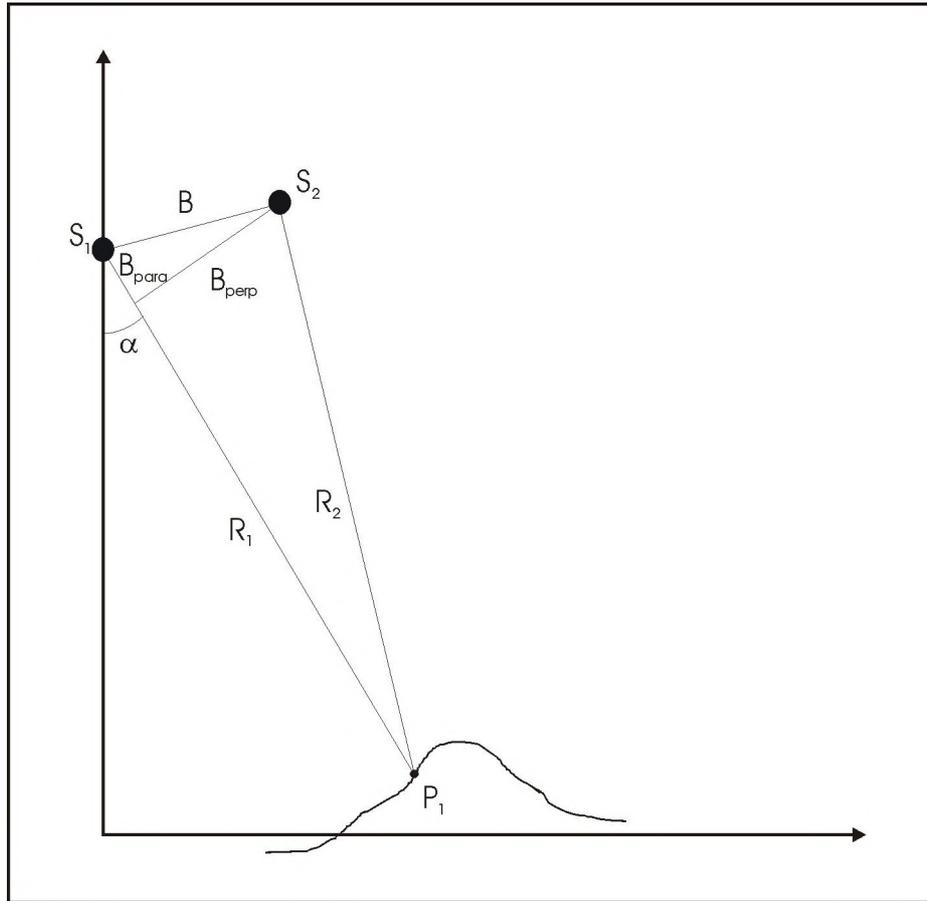


Figura 2.8 Geometría de un sistema interferométrico.

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal y el factor 2 toma en cuenta que la distancia  $R_1$  es recorrida en ambos sentidos. Si la fase puede ser medida con precisión, entonces es posible conocer  $R_1$  con un error equivalente a una fracción de la longitud de onda. Y teniendo en cuenta que  $\lambda$  varía entre 1 y 30cm para los radares más comunes, vemos que se puede conocer la distancia radar-objetivo con gran precisión. Es preciso hacer notar que la fase registrada estará afectada por una ambigüedad de  $n$  ciclos completos, a priori desconocida.

La diferencia de fase entre pixels correspondientes de las dos imágenes tomadas desde  $S_1$  y  $S_2$ , será proporcional a la diferencia de camino recorrido.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}(R_2 - R_1) = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R \quad (2)$$

Si  $F_1(P_i)$  y  $F_2(P_i)$  son las imágenes SAR complejas enfocadas del punto  $P_i$ , tomadas desde los satélites  $S_1$  y  $S_2$ , la imagen interferométrica (o interferograma) de ambas será:

$$I(P_i) = F_1(P_i)F_2^*(P_i) = |F_1(P_i)||F_2(P_i)|e^{j\Delta\phi} \quad (3)$$

Puede observarse que la fase del interferograma es la diferencia de fase debida al distinto camino recorrido por la onda electromagnética en cada toma. Ahora, si sobre esta imagen se pasa de un pixel al vecino, puede demostrarse que la variación en la fase

interferométrica ( $\Delta\psi$ ) es proporcional a la variación de cota topográfica ( $q$ ) entre pixeles vecinos[27](según la ecuación 4 y figura 2.9).

$$\Delta\psi = \frac{4\pi}{\lambda \cdot R_1 \cdot \sin(\alpha)} \cdot B_{\text{perp}} \cdot q \quad (4)$$

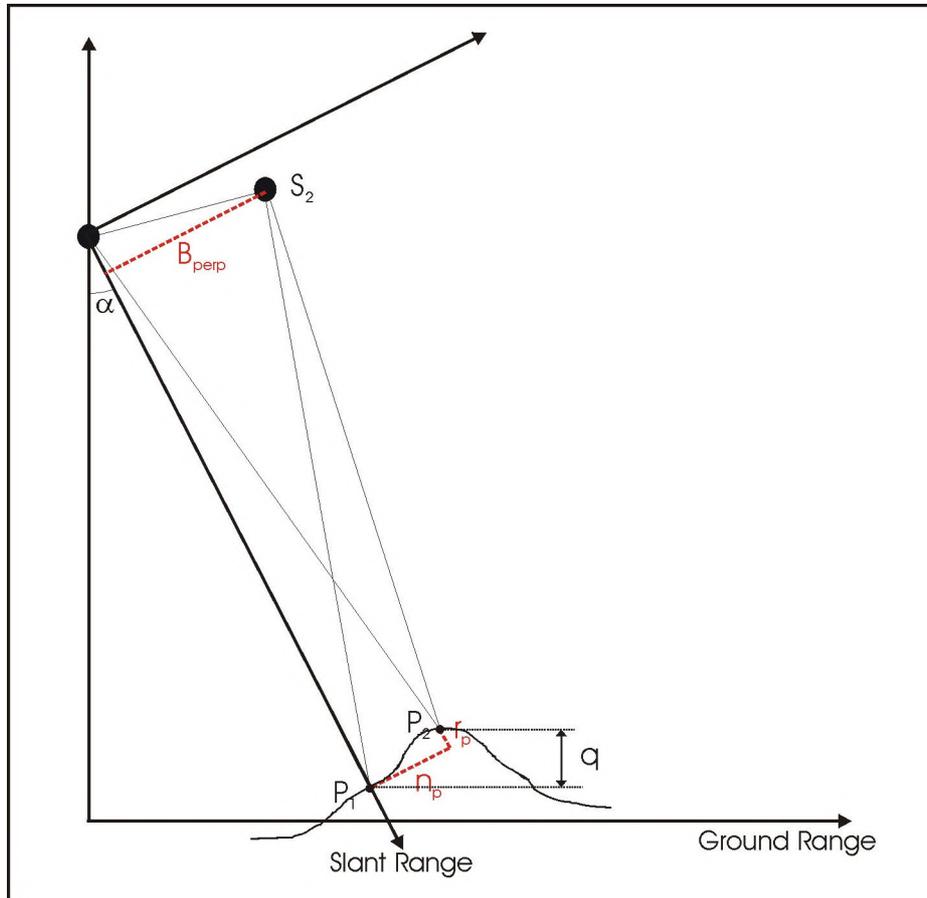


Figura 2.9 Relación entre la configuración de adquisición y la cota topográfica ( $q$ )

De esta manera es posible relacionar el interferograma con las cotas topográficas( $q$ ) de los pixeles.

### Sensibilidad en altura

Es importante hacer un breve análisis de la sensibilidad en altura que brinda el sistema interferométrico. En primer lugar se debe tener en cuenta que la fase del interferograma no es absoluta, sino que viene en módulo  $2\pi$ . O sea que al hacer la operación de interferencia (ecuación 3) se obtienen valores de fase que varían en el rango  $-\pi$  a  $\pi$ , o ciclos de  $360^\circ$ . Dichos ciclos son llamados franjas (*fringes*) en la literatura y corresponden, suponiendo que la información de fase solo corresponde a la topografía, a curvas de nivel topográfico. En la figura 2.10 puede verse un ejemplo de franjas extraído de un caso real.

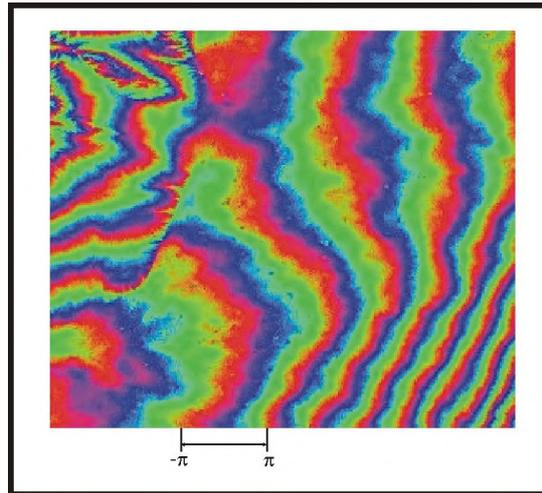


Figura 2.10 Extracto de un interferograma real. Cada ciclo de colores amarillo – rojo – azul – verde – amarillo indica un cambio de fase de  $360^\circ$  ( $2\pi$  rad)

Trabajando sobre la ecuación 4 es posible derivar una relación entre el cambio en cota topográfica y el cambio de fase correspondiente a una franja ( $360^\circ$ ) como:

$$\frac{q}{\Delta\psi} = \frac{1}{\left[ \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{B_{perp}}{R_1} \cdot \frac{1}{\sin(\alpha)} \right]} \text{ (metros/360}^\circ\text{)} \quad (5)$$

que da una idea de la variación en cota topográfica representada por un ciclo de fase en función de los parámetros del sistema. Mientras menor es esta relación, mayor es la sensibilidad en altura, es decir, un número mayor de ciclos de fase representa un cambio de cota topográfica dado entre dos posiciones dentro de la imagen.

Puede notarse que cuando la línea de base aumenta, la sensibilidad en altura mejora, y que para  $B_{perp}=0$  (dos imágenes tomadas desde la misma posición), el sistema es incapaz de resolver cambios en altura. La figura 2.11 muestra un ejemplo sintético en donde se ha simulado la fase modulo  $2\pi$  de una superficie cónica (se muestra un cuarto del cono). Los parámetros utilizados son  $\alpha=23^\circ$  y  $R_1=844.5\text{km}$ , con  $B_{perp}=50\text{m}$  en A y  $B_{perp}=200\text{m}$  en B. Puede observarse claramente la menor sensibilidad en altura en el caso A ( $775.4\text{m}/360^\circ$ ) que en el caso B ( $193.9\text{m}/360^\circ$ ).

Sin embargo, grandes líneas de base producen un efecto indeseado, que es denominado decorrelación geométrica y que se verá más adelante. Por esta causa, la selección de la línea de base conduce a una solución de compromiso.

Otro factor importante es la longitud de onda del sistema. Puede notarse en la ecuación 5 que sistemas con  $\lambda$  más grande son menos sensibles a cambios de altura topográfica.

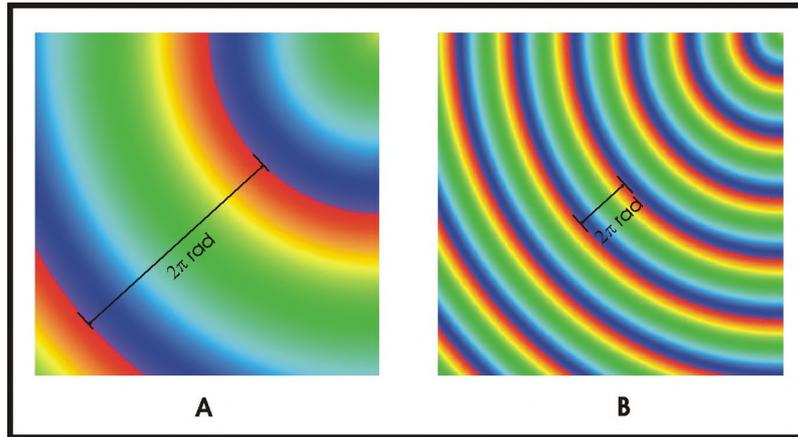


Figura 2.11 Fase enrollada resultante de la modelación de una superficie cónica vista por un radar con  $\alpha=23^\circ$ ,  $R_1=844.5\text{km}$  y  $B_{\text{perp}}=50\text{m}$  (A) y  $B_{\text{perp}}=200\text{m}$  (B). Sobre las mismas se ha marcado un ciclo de  $360^\circ$  a modo indicativo.

## Decorrelación entre imágenes

Un pulso electromagnético emitido por el radar recorre el camino entre la antena y el terreno, interactúa con los elementos del terreno ubicados dentro de una celda de resolución, y parte de la señal vuelve a la antena y es registrada. Para que dos pulsos coherentes estén correlacionados entre sí, es necesario que la interacción de los mismos con los elementos reflectores sea la misma. Si postulamos que una celda de resolución con un tamaño equivalente a varias longitudes de onda incluye varios centros de retrodispersión, el campo dispersado será la suma coherente de los campos individuales de cada centro. Si los elementos reflectores están ubicados aleatoriamente, entonces la fase correspondiente a cada uno de ellos será aleatoria y la suma puede ser caracterizada por una distribución gaussiana compleja con media cero y varianza proporcional a las *radar cross sections* de la superficie[28].

Esto es válido para cada una de las imágenes tomadas. Cuando el experimento es repetido para adquirir dos imágenes del mismo sitio, la correlación entre imágenes depende de los cambios producidos a nivel de cómo el radar ‘ve’ los elementos reflectores en el terreno. Si las imágenes no son tomadas desde exactamente el mismo sitio en el espacio, la geometría de observación varía y aparece una componente de decorrelación denominada decorrelación geométrica. Si el terreno se modifica entre adquisiciones, aparece una segunda componente de decorrelación, denominada decorrelación temporal.

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

### Decorrelación geométrica

Un punto en el terreno es observado por el radar con una geometría interferométrica determinada. En la medida en que mayor sea la línea de base entre imágenes, más

distinto será el ángulo de incidencia correspondiente a cada una de ellas, tal como muestra la figura 2.12 Como consecuencia de esto, a medida que la línea de base aumenta, la decorrelación también aumenta, y esto ocurre hasta un punto denominado línea de base crítica, para la cual la correlación entre imágenes es nula. Zebker et al. [29] deducen el valor de esta línea de base crítica como:

$$B_c = \frac{\lambda \cdot R}{2 \cdot R_y \cdot \cos \theta} \quad (6)$$

donde  $R_y$  es la resolución sobre el suelo en la dirección de rango (perpendicular al vuelo del satélite) y  $\theta$  es el ángulo de incidencia local. Valores típicos de  $B_c$  para distintos satélites se listan en la Tabla 2-IV.

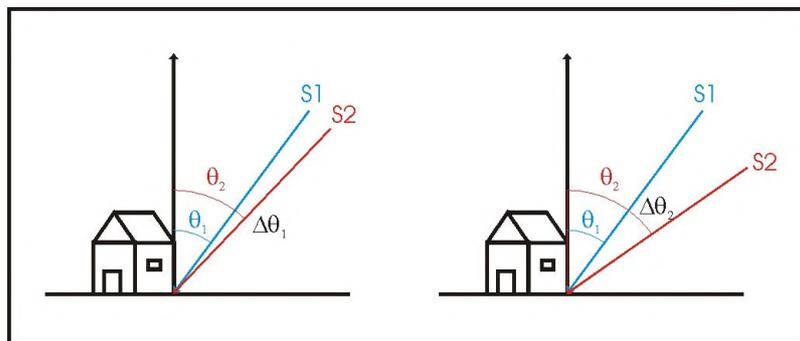


Figura 2.12 Variación en los ángulos de incidencia locales para dos situaciones con diferente línea de base. Puede observarse que  $\Delta\theta_2$  es mayor que  $\Delta\theta_1$  como consecuencia de una mayor línea de base entre imágenes.

TABLA 2-IV  
 LÍNEA DE BASE CRÍTICA PARA DISTINTOS SISTEMAS DE RADAR

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

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

<sup>(1)</sup> El rango corresponde a los modos Image 1 al 7, con ángulos de vista variables.

Amplios estudios de este fenómeno pueden encontrarse en Li y Goldstein[30], Zebker y Villasenor[28] y Gatelli et al.[31].

## Decorrelación temporal

Un determinada porción de terreno, vista a la escala de la Energía Electromagnética incidente, presenta una distribución aleatoria ya que dentro de cada celda de resolución se hallan presentes múltiples centros de retrodispersión[32]. O sea que cambios en la distribución de los reflectores ocurridos en el período de tiempo entre adquisiciones van

a modificar la respuesta y por lo tanto introducirán decorrelación entre imágenes. Ésta es la raíz del fenómeno de decorrelación temporal.

El tiempo que podrá transcurrir antes de que la decorrelación sea completa depende de la velocidad con que ocurran cambios del orden de  $\lambda$ . Esto es función directa del tipo de terreno y de los fenómenos climáticos involucrados. Como regla general puede decirse que mientras más grande es  $\lambda$ , más tiempo se mantiene la correlación[33].

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

Es importante notar que para que se de el fenómeno de decorrelación es necesario que el movimiento de los reflectores sea aleatorio y del orden de la longitud de onda incidente. Numerosas simulaciones y estudios de este fenómeno pueden encontrarse en la literatura[28][30]. Movimientos en bloque del terreno producen un cambio de fase mensurable y que puede ser utilizado para detectar y caracterizar campos de desplazamiento[34].

## Grado de Coherencia

Para caracterizar el fenómeno de decorrelación entre imágenes se utiliza el grado de coherencia (usualmente denominado coherencia o correlación interferométrica), definido pixel a pixel entre dos imágenes complejas  $S_1$  y  $S_2$  como[35]

$$\gamma = \frac{|E[S_1 \cdot S_2^*]|}{\sqrt{E[|S_1 \cdot S_1^*|] \cdot E[|S_2 \cdot S_2^*|]}} \quad (7)$$

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

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

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

La figura 2.13 (extraída de Zebker[28]) muestra la relación entre la coherencia, la desviación estándar de la fase y el número de *looks* con que ha sido procesado el

interferograma. Este último parámetro se refiere a diferentes niveles de promedio espacial destinados a disminuir el error en fase. Se debe tener en cuenta que a mayor número de *looks*, mayor es la pérdida de resolución espacial del interferograma y por lo tanto del MDE resultante. Es claro, después de observar la figura, que se debe mantener elevado el nivel de correlación (coherencia) si se quiere obtener un producto final con errores aceptables.

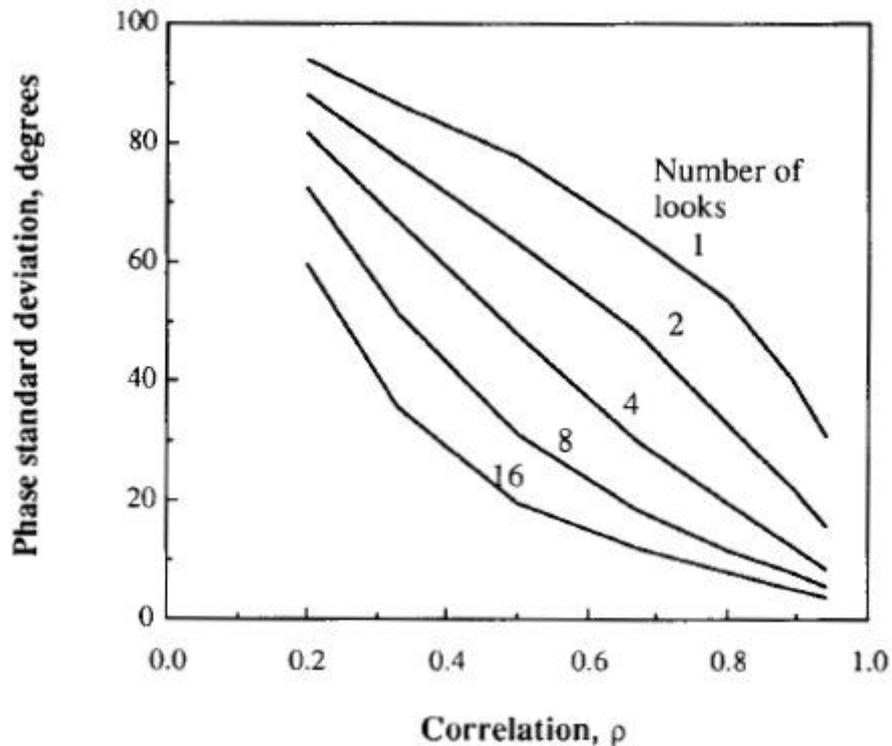


Figura 2.13 Relación entre la desviación estándar de la fase, la correlación y el número de looks<sup>3</sup>.

## Influencia de la atmósfera

En la deducción de la ecuación (4), que relaciona fase con topografía, se ha supuesto que la velocidad de propagación de la EM emitida por el radar es constante e igual a la velocidad de la luz en el vacío. Esta suposición no es completamente válida en la atmósfera terrestre, la cual es inhomogénea y tiene un índice de refracción ligeramente más elevado que el del vacío. Esto implica que las cotas topográficas calculadas con (4) en base a consideraciones geométricas, estarán afectadas por errores si los tiempos de tránsito y las fases observadas se ven alteradas por la atmósfera.

Como el interferograma está formado por las diferencias de fase entre dos imágenes, no son los retardos atmosféricos absolutos los que introducen error, sino la variación de los retardos en una y otra toma. Según Hanssen[36] dos capas de la atmósfera introducen errores de distinta naturaleza: la ionósfera y la tropósfera.

Un incremento del número de electrones libres en la ionósfera produce una aceleración de la señal electromagnética. El contenido de electrones libres en esta capa de la

<sup>3</sup> Extraída de Zebker[28]

atmósfera puede ser estimado en base a mediciones de GPS y se ha demostrado que presenta una variabilidad caracterizada por longitudes de onda espaciales de decenas, centenas y miles de kilómetros.

La velocidad de propagación en la tropósfera depende de la temperatura, presión atmosférica y humedad relativa. El retardo puede descomponerse en retardo hidrostático (el debido a la presión atmosférica) y retardo húmedo (el debido a la humedad relativa), siendo este último el más difícil de estimar debido a la elevada variabilidad de la humedad relativa[37].

Como resultado de los retardos descriptos, aparecen anomalías en el interferograma, y no es posible determinar si son rasgos topográficos o errores sin información adicional[38]. Por ello se han propuesto varios modelos que permiten tener en cuenta este fenómeno, desde ecuaciones semiempíricas que dan el retardo en función de valores de presión, temperatura y humedad relativa medidos en superficie, hasta modelos atmosféricos complejos basados en mediciones de estaciones continuas de GPS[39].

Como ejemplo de los problemas descriptos, Zebker et al.[38] utilizan la relación empírica de la ecuación 8 para calcular el camino adicional recorrido por la onda electromagnética en una atmósfera real. En la misma  $\Lambda$  es la latitud y  $P_s$ ,  $T_s$ , y  $e_s$  son la presión (milibares), la temperatura (Kelvin) y la presión parcial de vapor de agua (milibares) en superficie respectivamente. Este valor de  $\Delta x$  puede ser traducido fácilmente en valores de fase.

$$\Delta x = \left[ 2.277 \times 10^{-3} - 1.11 \times 10^{-5} \cdot \cos(\Lambda) \right] \cdot P_s + 2.277 \times 10^{-3} \cdot \left[ 0.05 + \frac{1255}{T_s} \right] \cdot e_s \quad (8)$$

### **Análisis de sensibilidad de los errores sobre las cotas calculadas**

Se han descripto hasta aquí las distintas fuentes de error que pueden afectar al procesamiento interferométrico de imágenes de radar. El paso siguiente es estimar cómo se traducen en error en cota los fenómenos descriptos. Para ello se toman las ecuaciones que relacionan el error en cota con los errores en fase y en línea de base y se realizan simulaciones sobre un caso real. En este trabajo las simulaciones se han realizado sobre datos del futuro satélite argentino SAOCOM, por considerarse de mayor interés para el desarrollo de futuros proyectos de investigación.

Decorrelación geométrica, decorrelación temporal, ruido propio del sistema y anomalías atmosféricas son factores que introducen incertidumbre en la fase del interferograma. Esta incertidumbre se traduce en incertidumbre en las cotas calculadas. Según Zebker et al.[29] puede calcularse el error en cota en función del error en fase y del error en la estimación de la línea de base, con las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_z = \frac{\lambda \cdot R}{4\pi \cdot B} \left[ \sin \alpha - \cos \alpha \cdot \tan(\alpha - \theta) \right] \cdot \sigma_\phi \quad (9)$$

$$\sigma_z = \frac{R}{B} \sin \theta \cdot \sin \alpha \cdot \sigma_{B_y} \quad (10)$$

$$\sigma_z = \frac{R}{B} \sin \theta \cdot \cos \alpha \cdot \sigma_{B_x} \quad (11)$$

donde  $R$  es la distancia entre el radar y un punto en el terreno,  $B$  es la línea de base,  $\alpha$  es la inclinación de la línea de base respecto de la horizontal,  $\theta$  es el ángulo de vista y donde  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\phi$  y  $\sigma_B$  son desviaciones de altura, fase y línea de base respectivamente.

Estos errores son de naturaleza diferente. El error en fase incrementa la variabilidad estadística de cada punto del MDE. En cambio, los errores en la línea de base introducen un error sistemático en la cota, que afecta a todo el MDE de manera similar.

La simulación realizada con datos del SAOCOM (tabla 2-III) dio los resultados presentados en la figura 2.14 Allí se muestra cómo se traducen los errores de fase en errores de cota para el modo standard 1 de dicho satélite. Se ha tomado para el ejemplo un ángulo de observación ( $\theta$ ) medio de  $19.05^\circ$  y una inclinación de la línea de base ( $\alpha$ ) de  $0^\circ$ , y se ha realizado el cálculo para diferentes valores de línea de base. Puede observarse que para valores de error en fase como los indicados por la figura 2.13, los errores en cota son significativos para casos reales.

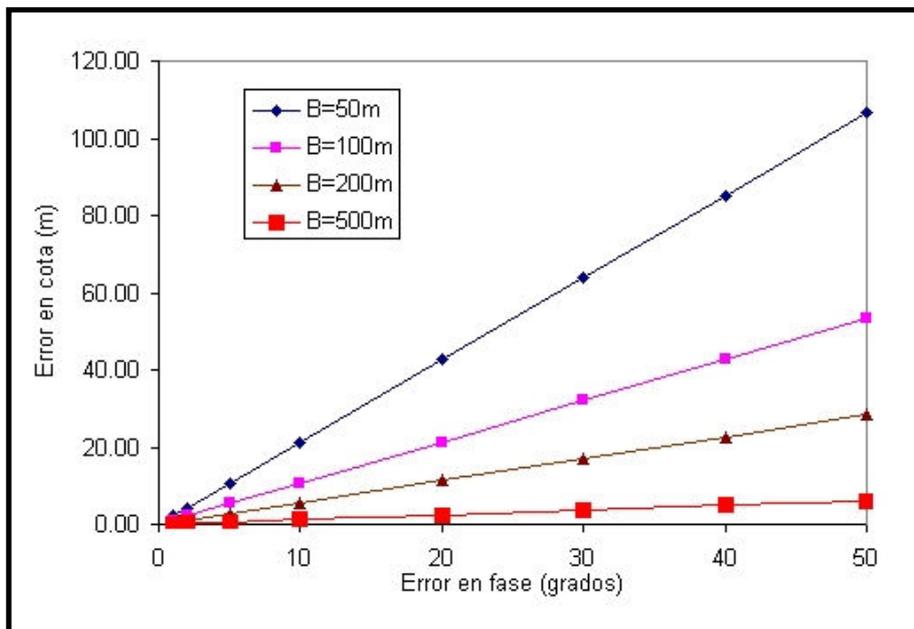


Figura 2.14 Influencia del error de fase en las cotas calculadas.

Existen técnicas que permiten disminuir la variabilidad en fase a partir de la utilización de un elevado número de imágenes tomadas durante largos períodos de tiempo, tales como SBAS(*Small Baseline Subsets*)[40], *Stacking*[41], *Permanent Scatterers*[42] o distintos tipos de sumas pesadas[43]. En la práctica, no siempre es posible obtener el número de imágenes necesario (o la distribución de fechas necesaria), debido a su alto costo o a que simplemente tales imágenes no existen (este último es un problema especialmente grave para posiciones en la Argentina).

Para demostrar la influencia del desconocimiento de la línea de base en las cotas obtenidas se muestran los resultados de una simulación realizada durante este trabajo para el modo standard 1 proyectado para el satélite SAOCOM. Este modo tiene ángulos de observación de  $16.6^\circ$  (rango cercano) a  $25.1^\circ$  (rango lejano). Se supone línea de base horizontal, esto es  $\alpha=0^\circ$  y un ángulo de observación medio de  $19.05^\circ$  y se calcula el error absoluto en cota mediante la ecuación 11, para distintos valores de línea de base. Los resultados se muestran en la figura 2.15, donde puede notarse que aún muy pequeños errores en la estimación de la línea de base (del orden de unos pocos centímetros) introducen errores grandes en las cotas obtenidas (del orden de metros o decenas de metros). Nótese también que los errores disminuyen si se utilizan líneas de base más grandes.

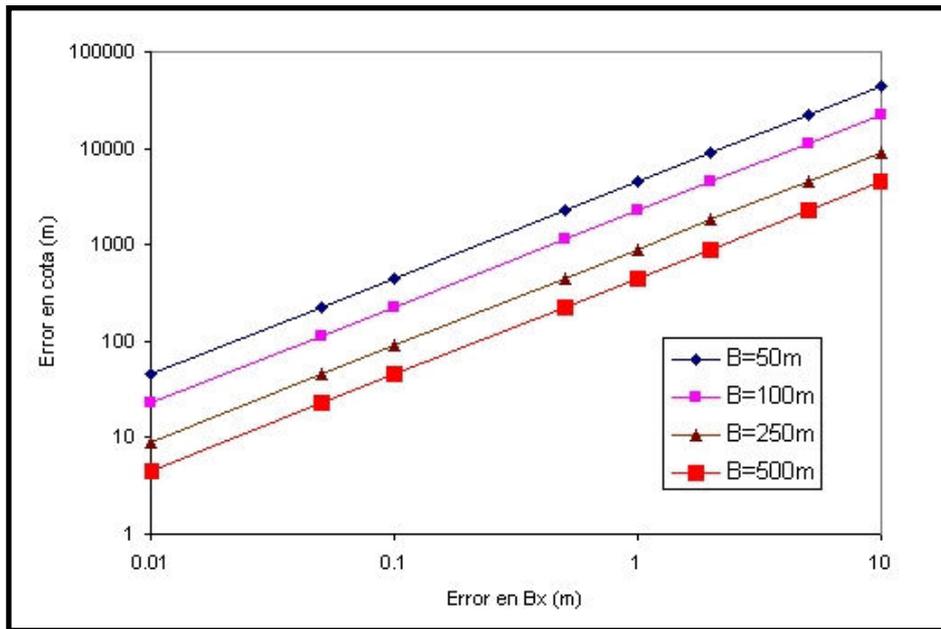


Figura 2.15 Influencia del desconocimiento de la línea de base en las cotas calculadas mediante un sistema interferométrico.

Por otra parte, el desconocimiento de la línea de base introduce una rampa de fase que es imposible distinguir de un rasgo topográfico sin tener un conocimiento previo de la topografía. Esto puede verse claramente calculando el error relativo que se produce dentro de una escena debido a la variación de ángulo de incidencia entre el rango cercano y el rango lejano. Para ello se utiliza la siguiente ecuación, derivada de la ecuación 10:

$$\Delta\sigma_z = \left( \frac{r}{B} \sin \theta \cdot \cos \alpha - \frac{r_0}{B} \sin \theta_0 \cdot \cos \alpha \right) \cdot \sigma_{B_x} \quad (12)$$

donde  $r_0$  y  $\alpha_0$  son la distancia radar-suelo y el ángulo de observación para el rango cercano respectivamente. La figura 2.16 muestra los resultados calculados, para el modo standard 1 del SAOCOM ya mencionado, tomando en cuenta errores en la estimación de la línea de base de 1cm y 5cm. Puede observarse claramente que las cotas obtenidas estarán afectadas por una rampa de error en sentido del rango y que aún para valores pequeños de  $\sigma_{B_x}$  (1cm) el error puede ser grande. En este caso la magnitud del efecto

disminuye para líneas de base más grandes (nótese que las escalas verticales son diferentes en la figura 2.16).

Actualmente es posible utilizar órbitas de gran precisión, calculadas por la ESA o por la Universidad de Delft[44] para los satélites ERS y ENVISAT. Sin embargo, la experiencia indica que aún utilizando esta información, persisten errores de este tipo en los MDE obtenidos.

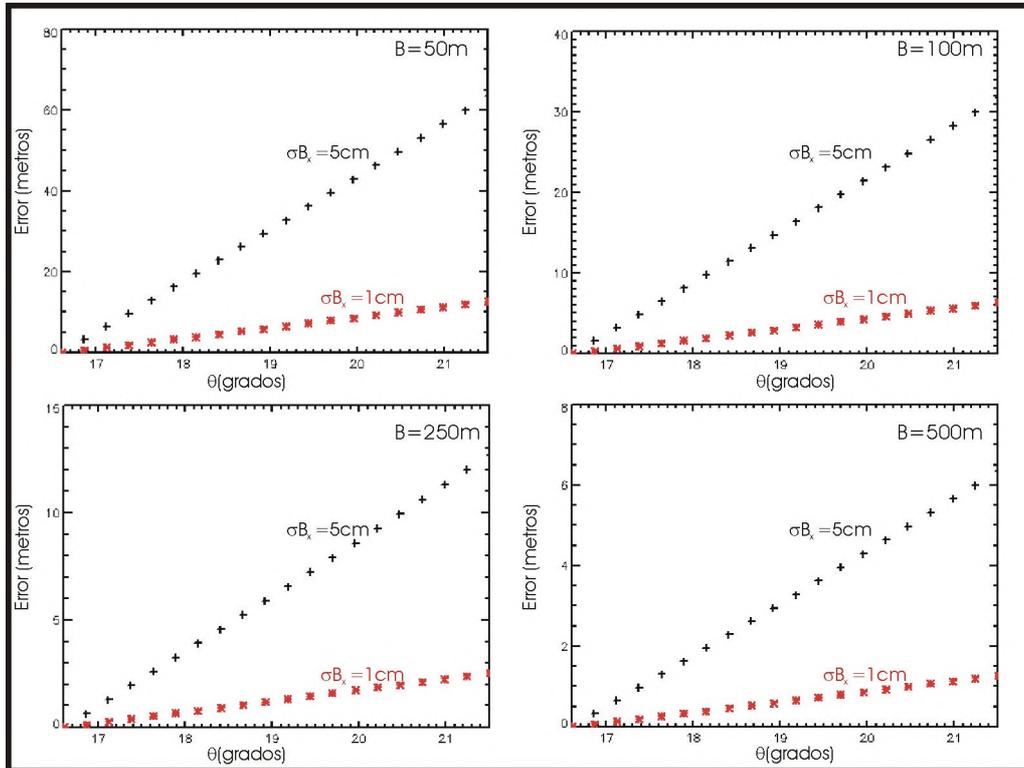


Figura 2.16 Influencia del desconocimiento de la línea de base en el error relativo en cota. Se grafica el error relativo calculado con la ecuación 12 vs. el ángulo de observación ( $16.6^\circ$  a  $25^\circ$ ) para modo standard 1 proyectado del SAOCOM. Nótese que las escalas verticales son diferentes.

Existen también metodologías que permiten refinar la línea de base implementadas en *softwares* comerciales[45] utilizando un método de prueba y error, que funcionan razonablemente bien si dentro de la imagen hay un rasgo de topografía constante, como por ejemplo una línea de costa. Sin embargo, en la práctica siempre queda una componente de error remanente que es necesario eliminar del producto final de otra manera.

En cuanto a la influencia de la variabilidad atmosférica, se presentan como ejemplo los resultados de una simulación hecha para las características del modo standard 1 del SAOCOM. En la figura 2.17 se muestran las curvas de variabilidad de fase en función de cambios en la humedad relativa (A) y de la presión atmosférica (B). De las figuras se deduce que cambios no muy grandes de humedad relativa o de presión entre las adquisiciones de imágenes pueden introducir cambios de fase de varios ciclos.

Es necesario decir que típicamente la presión atmosférica y la humedad relativa tienen una alta variabilidad temporal pero una baja variabilidad espacial. Esto quiere decir que es altamente probable que ciertos cambios ocurran en pocas horas, pero dichos cambios

abarcarán áreas de gran extensión (decenas a cientos de kilómetros). Esto implica que las deformaciones del MDE resultante debidas a este fenómeno tendrán típicamente una extensión regional y representarán rasgos topográficos que no existen en la realidad.

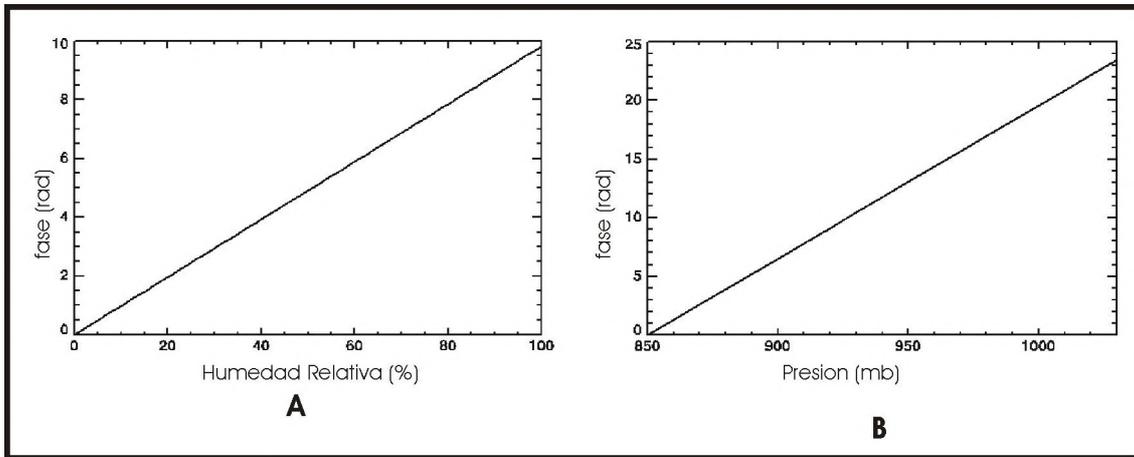


Figura 2.17 Influencia de las variables atmosféricas Humedad Relativa y Presión sobre la fase interferométrica.

## Importancia de los errores

Como se puede observar por lo expuesto anteriormente, la generación de MDEs mediante el método interferométrico tiene asociados diferentes tipos de error que es necesario corregir para obtener un producto útil. El ruido en la fase provocado por decorrelación temporal y espacial es una fuente importante de error, y es necesario minimizarlo eligiendo apropiadamente las imágenes que se van a utilizar. El desconocimiento de los parámetros orbitales y de la configuración de adquisición introducen errores absolutos y rampas de fase dentro de una misma escena; es posible minimizarlos utilizando información más precisa, pero la misma no está siempre disponible y en algunos casos la precisión necesaria es imposible de alcanzar con la tecnología actual. Por último, la influencia de la atmósfera debe ser tomada en cuenta ya que introduce rasgos topográficos inexistentes y muy difíciles de discriminar. Este último error es particularmente dramático, porque las mediciones de parámetros atmosféricos son siempre escasas para alimentar un hipotético modelo de corrección.

Como un aporte para reducir los problemas citados y obtener MDEs de utilidad en el campo aplicativo, en el capítulo siguiente se proponen algoritmos de corrección y ajuste de los mismos mediante la utilización de series de puntos medidos sobre el terreno.

# 3

## **AJUSTE DEL MDE EN BASE A PUNTOS CONFIABLES**

### **Introducción**

Los factores descriptos en los capítulos anteriores introducen errores en el MDE calculado. Es necesario, entonces, plantear una metodología de corrección que permita ajustar el modelo a datos reales.

En este capítulo se propone una técnica de corrección de MDE's que combina transformaciones rígidas con deformaciones de la superficie, basadas en una serie de puntos medidos en el terreno. El objetivo del método propuesto es realizar la corrección del MDE de manera tal que se ajuste a la forma de la superficie terrestre de la mejor manera posible, en base a la información disponible. La idea detrás de este objetivo es que es posible combinar la información extensiva, como es el modelo contruido a partir de imágenes satelitales, con la información localizada y de alta precisión constituida por puntos medidos en el terreno, obteniendo como resultado una combinación de lo mejor de cada fuente.

Para ilustrar la metodología propuesta se utiliza un ejemplo sintético que consiste en dos superficies a las cuales se les ha sumado la misma textura. La superficie base A (figura 3.1) es un plano y la superficie base B (figura 3.2) es un paraboloides que ha sido desplazado verticalmente en cota. Se supone que el plano es la superficie correcta y el paraboloides es una versión deformada. De esta manera, el objetivo del experimento es llevar el paraboloides al plano.

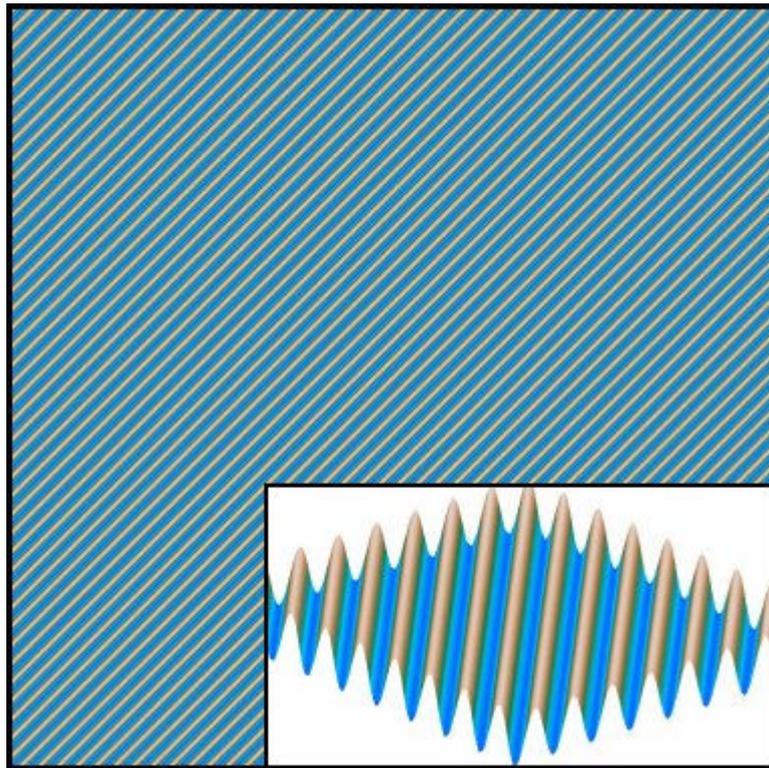


Figura 3.1 Plano más textura. Visualización en planta y tridimensional.

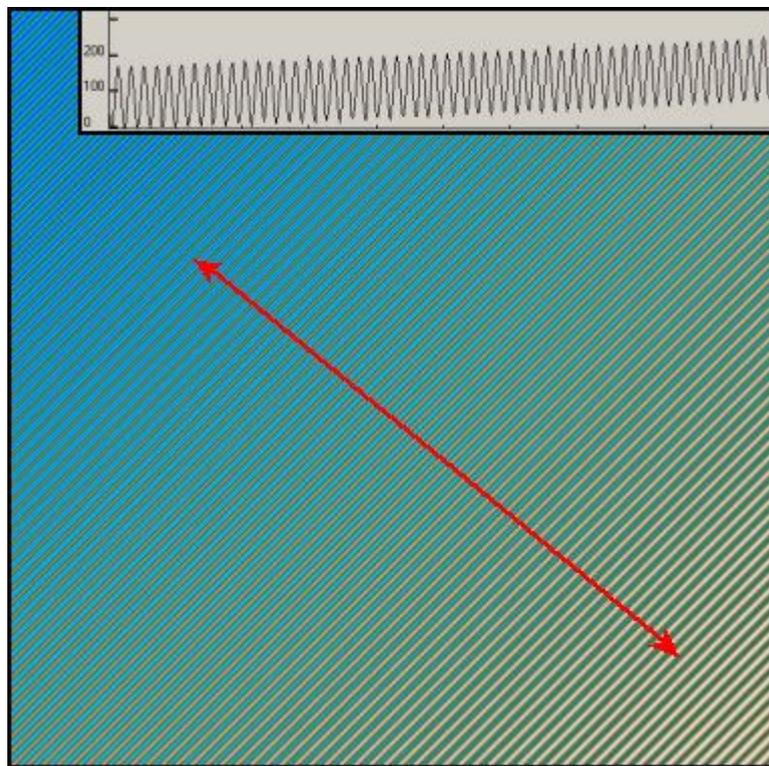


Figura 3.2 Paraboloides más textura. Visualización en planta y corte.

De la superficie “real”, es decir, del plano más textura de la figura 3.1 se extrajeron varias grillas de puntos de control que son utilizados para corregir el modelo deformado y estudiar el comportamiento de los algoritmos propuestos.

## Transformaciones Rígidas

Un primer paso a seguir es el de aplicar al MDE movimientos rígidos que permitan situarlo en una posición óptima respecto de la nube de puntos de corrección. En primer lugar postulamos un sistema de ejes coordenados que nos permitirá mayor claridad en la exposición a partir de ahora, según la figura 3.3. Entonces, los movimientos a aplicar pueden ser divididos, según este esquema, en movimientos en el plano  $xy$  y movimientos en  $z$ , y los mismos serán tratados por separado.

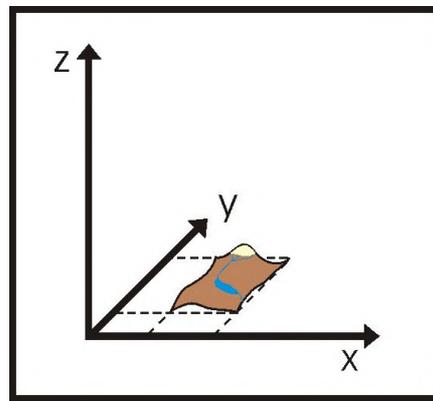


Figura 3.3 Sistema coordenado utilizado para el planteo de la corrección de MDEs.

Asumiendo en primera instancia que el modelo está perfectamente georreferenciado y solamente tiene errores atribuibles a un desplazamiento en  $z$ , es posible ajustarlo planteando la minimización del error en cota en algún sentido.

### Desplazamiento en $z$

El criterio elegido para calcular el desplazamiento que es necesario aplicar al MDE es la minimización de la suma del cuadrado de los errores puntuales, esto es, mínimos cuadrados. Este cálculo lleva a la obtención de un desplazamiento necesario según la ecuación

$$d = \frac{\sum (z_p - z_s)}{n} \quad (1)$$

en donde:

$d$ : desplazamiento

$z_s$ : cota del MDE

$z_p$ : cota del punto medido

y la sumatoria se extiende al número de puntos medidos  $n$ . La figura 3.4A muestra esquemáticamente el concepto aplicado.

## Inclinación

Un error común en los MDE construidos a partir de imágenes satelitales, y especialmente mediante interferometría de imágenes de radar, es que presentan una inclinación general (regional). Las razones por las cuales esto ocurre radican fundamentalmente en el desconocimiento de los parámetros orbitales, tal como ha sido detallado en el capítulo II de este trabajo.

Para resolver este problema, se le suma al MDE un plano inclinado que ha sido calculado en base a la lista de puntos mediante una regresión lineal. Este plano ajusta a la nube de puntos de control minimizando el error cuadrático medio. La figura 3.4B muestra el concepto aplicado.

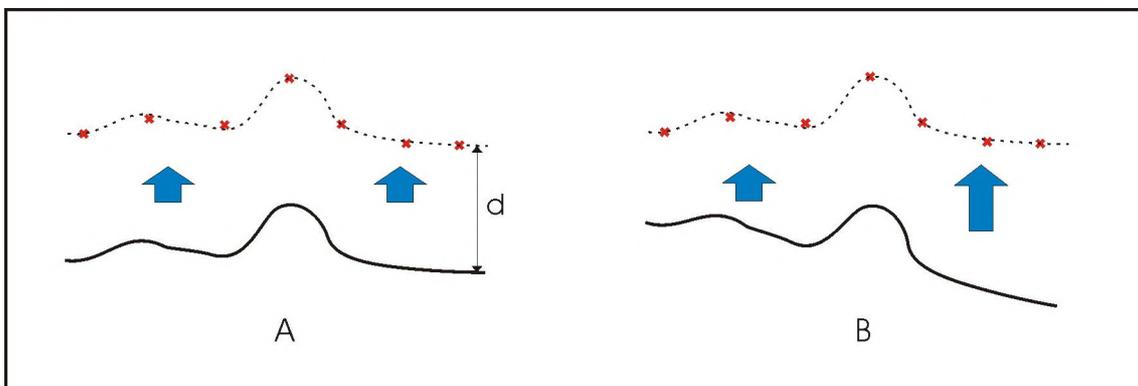


Figura 3.4 A) Esquema de desplazamiento rígido en z, B) Esquema de inclinación.

## Desplazamiento en el plano xy

Asumamos ahora que la georreferenciación del MDE no es perfecta. Esto nos deja la libertad de desplazar horizontalmente todo el modelo, lo cual puede ser hecho de forma de minimizar el error del MDE con respecto a los puntos de corrección. Si definimos este error como la suma de los cuadrados de las diferencias entre el MDE y los puntos:

$$rms = \frac{\sqrt{\sum (z_p - z_s)^2}}{n} \quad (2)$$

el procedimiento requerirá evaluar esta magnitud en todos los puntos de un dominio cercano al punto de partida, que es la georreferenciación original obtenida manualmente a partir de la correlación de formas visibles en una imagen satelital. La experiencia indica que el error cometido en este procedimiento es de pocos píxeles, con lo cual en general no es necesario utilizar un dominio muy grande para buscar la posición de mínimo error.

El procedimiento entonces consiste en evaluar  $d$  de la ecuación 1 para un dado desplazamiento  $xy$  del MDE, y calcular el error  $rms$  remanente luego de aplicar el desplazamiento  $d$  en vertical. Esto se debe realizar sobre todo el espacio de búsqueda y

quedarnos con el desplazamiento  $xy$  que minimiza el error  $rms$ . La figura 3.5 muestra un caso típico de la superficie  $rms$  que se obtiene. La posición del mínimo indica el desplazamiento  $xy$  necesario.

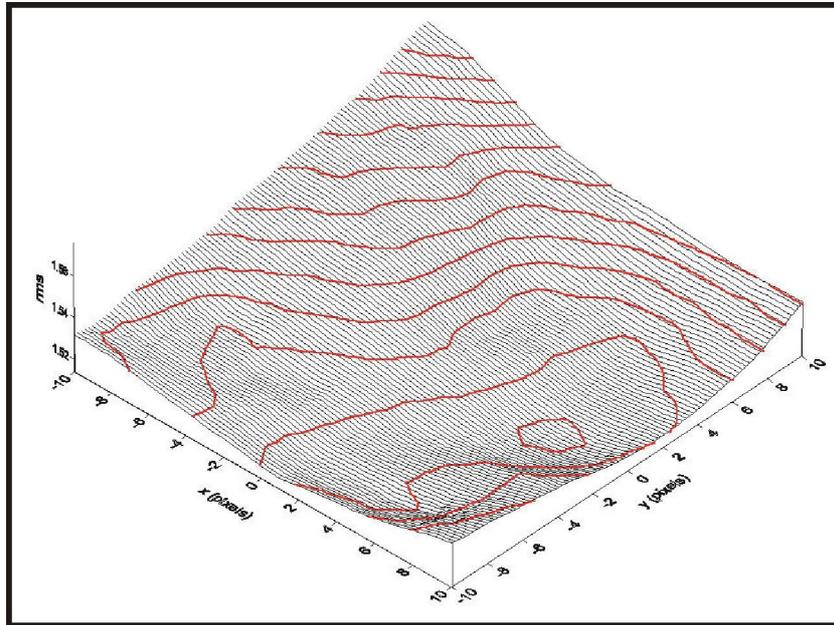


Figura 3.5 Superficie típica de error  $rms$ . Las coordenadas  $x$  e  $y$  son valores de desplazamiento necesario en pixeles para obtener la mejor georreferenciación. En este caso el algoritmo ha sido corrido sobre un dominio de  $20 \times 20$  pixeles y el desplazamiento es de 6 pixels en dirección  $x$  y  $-1$  pixel en dirección  $y$ .

Es posible que existan casos que no presenten un mínimo, como por ejemplo un plano horizontal o superficies que acepten deslizamientos sin cambio de forma, pero en general se trata de situaciones que no revisten gran interés práctico. En términos generales esta corrección constituye una aproximación válida de solución al problema de georreferenciar en forma precisa un MDE.

## Deformaciones

Una vez que la superficie se desplaza en forma óptima a la nube de puntos de control es posible que sea necesario aplicar una deformación a la misma que compense los errores residuales. Esta deformación puede ser calculada teniendo en cuenta distintos criterios, por ejemplo: se quiere hacer una corrección más detallada que un plano, o se quiere que cada punto de control sea respetado en forma exacta.

Lejos de ser opuestos, ambos tipos de corrección son complementarios. La clave de esta afirmación radica en el hecho de que, luego de la deformación rígida, es posible obtener una distribución de los residuos indicativa de la existencia de errores regionales distintos en ciertas zonas del MDE y de ajuste óptimo en otras zonas. Esto queda más claro si el error total luego de las transformaciones rígidas es descompuesto como la suma de una componente regional ( $e_r$ ) de baja frecuencia y una componente local ( $e_l$ ) de alta frecuencia.

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}_r + \mathbf{e}_l \quad (3)$$

Con este concepto, resulta sencillo notar que la corrección del MDE puede ser realizada atendiendo a cada componente por separado. En este trabajo se aplica una interpolación lineal filtrada (ILF) con un filtro pasabajos tendiente a corregir el error regional, y una función de corrección obtenida resolviendo una ecuación de Laplace para corregir los errores locales.

## Deformación Lineal

El objetivo en esta etapa es obtener una superficie de deformación que propague la información contenida en los puntos de control a las zonas del MDE que caen entre los mismos. De esta manera es posible compensar los errores de tipo regional, esto es, errores de igual signo y magnitud similar que afecten a grandes zonas del MDE.

La superficie de corrección utilizada es una poligonal que conecta a los puntos de control por medio de planos. Con esto lo que se está haciendo es aplicar una interpolación lineal entre los puntos conocidos. Para construir la poligonal se genera la triangulación Delaunay[47][48] del conjunto de puntos de corrección, al que se le agregan las cuatro esquinas del MDE de forma de garantizar que la triangulación cubra completamente al dominio. Las coordenadas de los nodos se definen:

$$\begin{aligned} x_p &= x_p \\ y_p &= y_p \\ z_p &= z_p - z_s \quad \text{si } p \text{ no es una esquina del MDE} \\ z_p &= f(x, y) \quad \text{si } p \text{ es una esquina del MDE} \end{aligned} \quad (4)$$

Para obtener los valores de  $z_p$  en las esquinas del MDE se calcula la ecuación de un plano mediante una regresión lineal con los puntos de control. Luego, las coordenadas de cada esquina del dominio son reemplazadas en dicha ecuación para obtener el valor adecuado. En la figura 3.6A se muestra una triangulación ejemplo.

Sin embargo, al interpolar de esta manera entre los puntos de control, además de capturar la deformación regional, esta superficie contiene todas las variaciones locales. Esto conlleva el problema de que, de aplicar así la corrección lineal, se estaría propagando a zonas alejadas del MDE las componentes locales del error total, lo cual no es lícito ni razonable. Una manera de solucionar este problema es aplicar un filtro pasabajos a la poligonal, ya que la componente local del error es típicamente de alta frecuencia. De esta manera se obtiene una poligonal suavizada que solamente contiene la deformación regional.

El tipo de filtro utilizado consiste en una convolución de las coordenadas de los vértices con un kernel pasabajos, y ha sido descrito en detalle en [49]. Dado un conjunto de vértices  $v_i$  que conforman una poligonal en tres dimensiones, es posible definir para cada vértice un subconjunto compuesto por los vecinos de primer orden de  $v_i$ , que son

aquellos vértices que comparten con  $v_i$  una cara. Con este esquema, el cambio de coordenadas de  $v_i$  queda

$$\Delta v_i = \sum_j w_{i,j} \cdot (v_j - v_i) \quad (5)$$

donde la sumatoria sobre  $j$  se extiende a los vecinos de  $v_i$  y los pesos  $w_{i,j}$  son números positivos cuya sumatoria es 1 para cada  $i$ . Existen distintos esquemas posibles de pesos. El más sencillo de ellos es asignar pesos iguales e inversamente proporcionales al número de vecinos  $n_i$  para cada vértice  $v_i$ .

$$w_{i,j} = \frac{1}{n_i} \quad \forall j \quad (6)$$

Otros esquemas posibles pueden tener en cuenta la distancia entre nodos. En el caso de MDE's construidos mediante interferometría de radar, el mapa de coherencia es un indicador de la bondad del valor de cota obtenido en cada posición, y tal información puede ser aprovechada en la selección de los pesos. Teniendo en cuenta esto, los pesos de los vecinos del vértice  $v_i$  se podrían calcular como:

$$w_{i,j} = \frac{\gamma_j}{\sum_j \gamma_j} \quad \forall v_j \text{ vecino de } v_i \quad (7)$$

Las nuevas coordenadas ( $v_i$ ) del vértice son calculadas iterativamente con la siguiente ecuación

$$v_i^{k+1} = v_i^k + \{\lambda, \mu\} \cdot \Delta v_i^k \quad (8)$$

utilizando alternativamente  $\lambda$  y  $\mu$  en el cálculo y siendo  $k$  el número de iteración. Para que trabaje como un filtro pasabajos los valores de  $\lambda$  y  $\mu$  deben ser seleccionados de manera tal que

$$k_{pb} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu} > 0 \quad (9)$$

donde  $k_{pb}$  es la frecuencia pasabajos. Para minimizar el número de iteraciones  $\lambda$  debe ser lo más grande posible, pero siempre manteniéndose menor que 1. Los valores elegidos en nuestro caso son  $k_{pb} = 0.1$  y  $\lambda = 0.63$ , con lo cual  $\mu = -0.672$ , de manera tal que el filtro actúe como filtro pasabajos.

Dado que el objetivo del filtrado en este caso es eliminar la componente local del error en cota, no tiene sentido aplicar el filtro a las coordenadas  $xy$ . Por el contrario, sería erróneo hacerlo, porque modificaría el aspecto de la superficie al modificar la ubicación de los nodos. Entonces, el filtro se aplica solamente a la coordenada  $z$  de los nodos de la poligonal.

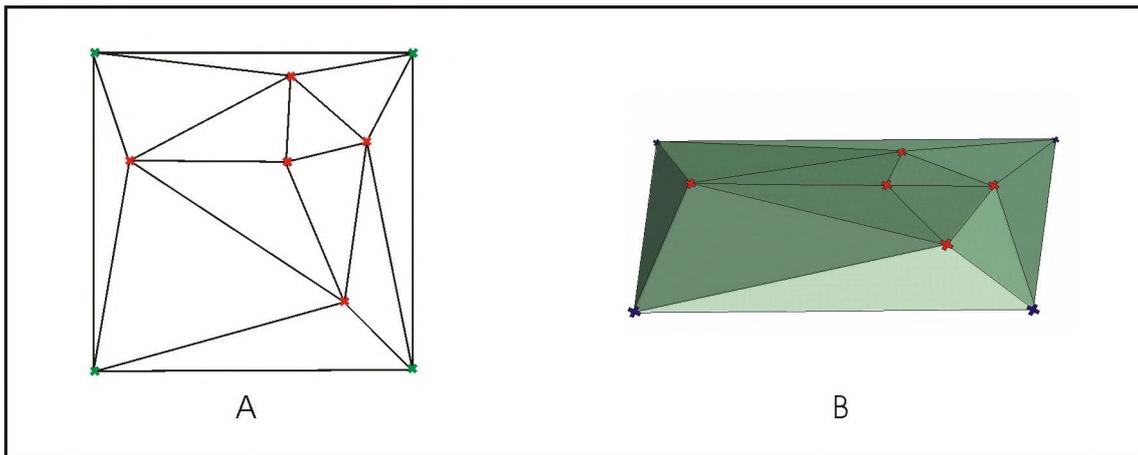


Figura 3.6 A) Triangulación ejemplo construida a partir de un conjunto de 5 puntos, B) Visualización tridimensional de la triangulación.

La figura 3.7 muestra la evolución de las coordenadas  $z_p$  de los puntos de control en función del número de iteraciones para un caso típico. El proceso se comporta como un proceso iterativo típico y se da por terminado cuando los valores de  $z_p$  se estabilizan, lo cual, como puede observarse en la figura, requiere pocas iteraciones.

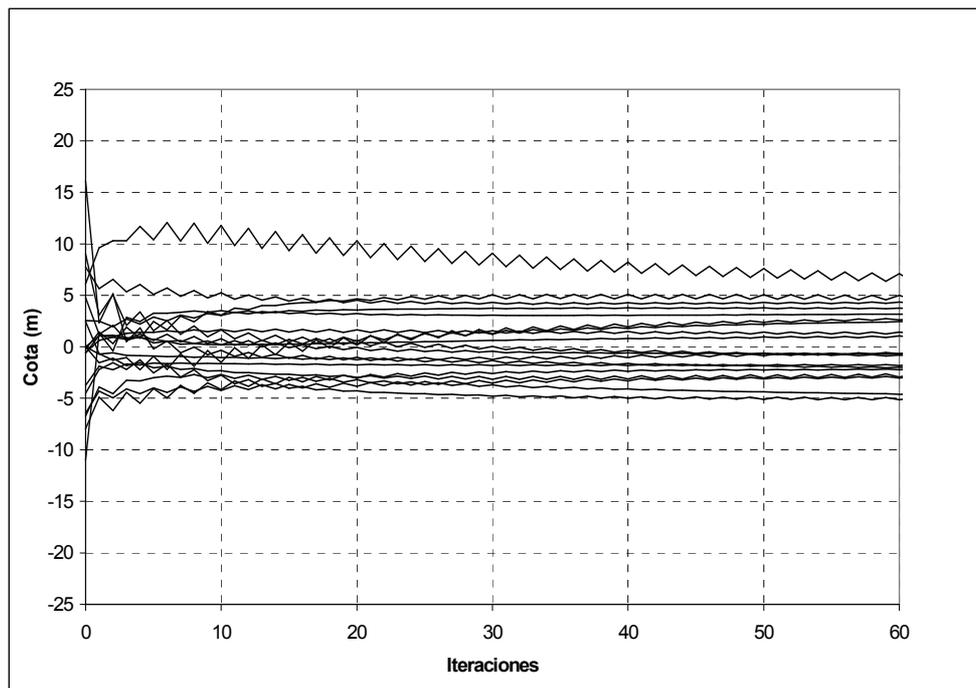


Figura 3.7 Comportamiento de la coordenada z de los puntos de control durante la aplicación del filtro.

Finalmente, la superficie de corrección obtenida se suma pixel a pixel a todo el MDE.

Para demostrar el funcionamiento de esta metodología se realizaron una serie de experimentos sobre el caso sintético presentado al principio de este capítulo (figuras 3.1 y 3.2). A partir de la superficie *real* (es decir, la superficie plana más textura) se construyeron varios conjuntos de puntos de corrección, que fueron utilizados para corregir el modelo deformado (es decir, el paraboloide más la textura). La Tabla 3-I y la

figura 3.8 muestran el error antes de corregir y los sucesivos errores al corregir con grillas de distinto espaciamiento. La figura muestra cómo caen drásticamente los indicadores de error para espaciamientos de grilla de 1km en adelante.

En la figura 3.9 se muestra la superficie de corrección construida con la grilla de un punto cada 500m. Si se observa con atención pueden notarse algunos artefactos sobre el borde inferior; los mismos se deben a un efecto marginal del filtro, que introduce algunas oscilaciones en puntos muy cercanos a los bordes.

**TABLA 3-I**  
**RESULTADOS DEL EXPERIMENTO DE CORRECCIÓN PARA**  
**DISTINTOESPACIAMIENTO DE PUNTOS DE CORRECCIÓN**

Espaciamiento	Error cuadrático medio (m)	Error máximo (m)
Sin corregir	130.5592	28.56
2000m	0.2028	5.0342
1000m	0.0265	1.5603
500m	0.0047	0.9383
200m	0.002	0.4488
100m	0.001	0.477

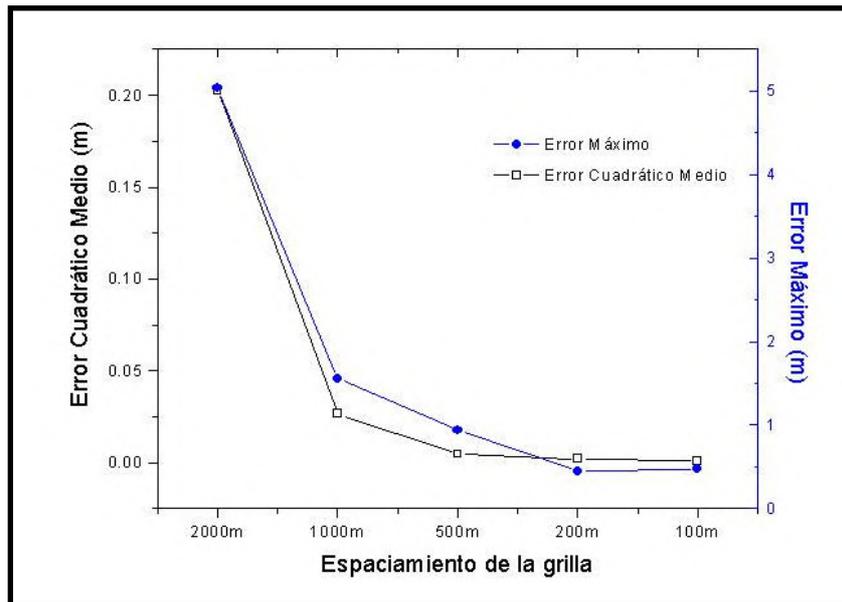


Figura 3.8 Errores posteriores a la corrección con diferentes espaciamientos de la grilla. La curva de error máximo se lee sobre el eje de la derecha, mientras que la de error cuadrático medio se lee sobre el eje de la izquierda.

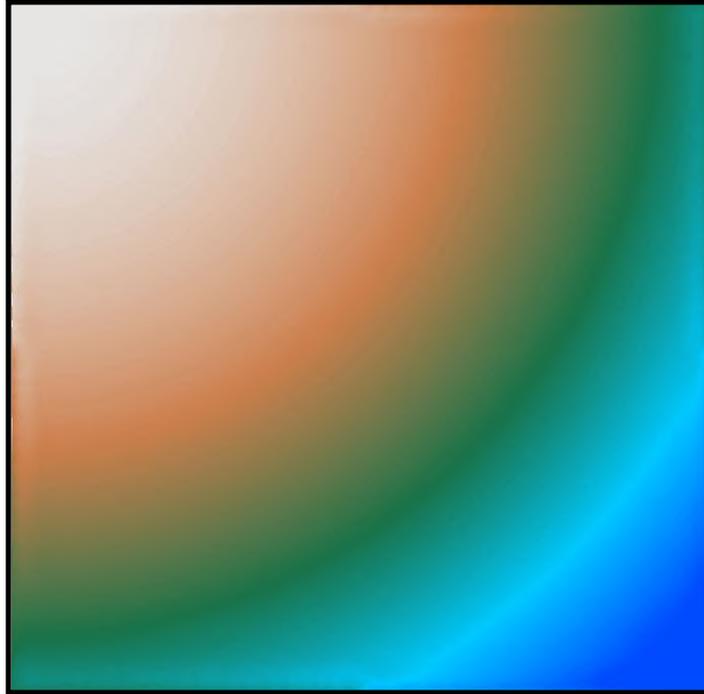


Figura 3.9 Superficie de corrección obtenida para el ejemplo sintético. Obsérvese que sobre los bordes el algoritmo genera algunos artefactos, especialmente notables en el borde inferior.

### Deformaciones Puntuales

La componente local del error es algo más difícil de tratar, ya que no necesariamente existe una función suave que la represente. Básicamente se pretende desplazar el valor de cota del pixel correspondiente al punto de control a su valor correcto, pero esto no puede realizarse aisladamente de su contexto, ya que se generaría una discontinuidad. Una elección mucho más adecuada es afectar a los vecinos con una función que decaiga rápidamente en función de la distancia. Algunos softwares comerciales utilizan funciones de tipo gaussianas para realizar esta interpolación[50].

La propuesta es construir una superficie gemela del MDE, donde a cada pixel correspondiente a un punto medido se le asigna el valor de error (diferencia entre la cota dada por el MDE y la cota medida) y a todos los demás pixeles se les asigna inicialmente el valor cero.

$$\begin{aligned} E_{i,j} &= z_p - z_s \quad \text{si existe } z_p \\ E_{i,j} &= 0 \quad \text{si no existe } z_p \end{aligned} \quad (10)$$

A partir de esta superficie, si  $i,j$  no es un punto fijo, la deformación para cada pixel se calcula según la ecuación

$$E_{i,j} = \frac{E_{i,j+1} + E_{i+1,j} + E_{i,j-1} + E_{i-1,j}}{4} \quad (11)$$

El cálculo se realiza en forma iterativa hasta que:

$$\max |E_{i,j}^{k+1} - E_{i,j}^k| < cota \quad (12)$$

donde  $k$  es el número de iteración.

La ecuación (10) es equivalente a resolver por diferencias finitas un problema de Laplace, donde la variable del problema es el error y los puntos medidos actúan como condiciones de contorno. Esta forma de interpolar resulta conveniente ya que lo que se obtiene es una función de interpolación suave que evalúa el error en cada punto en base a su distancia al punto medido. Como resultado se obtiene una superficie de error que asigna un desplazamiento particular a cada pixel del MDE y que es función de su distancia a un punto medido y al error encontrado en el mismo. En la figura 3.5 se muestra esta superficie para un caso típico.

El esquema de resolución de Gauss Seidel tiene una convergencia muy lenta, o sea que la implementación de este método en forma directa insume un elevado número de operaciones y como consecuencia un elevado tiempo de cálculo. Por esta razón se ha implementado un algoritmo tipo multigrilla que permite acelerar en buena medida el proceso. Los métodos multigrilla permiten resolver eficientemente ecuaciones diferenciales en derivadas parciales definidas en grillas extensas mediante la aplicación de esquemas de relajación de Gauss Seidel en grillas menos densas. Esto permite resolver PDE's elípticas discretizadas en una grilla de  $N$  celdas en  $\mathcal{O}(N \cdot \log N)$  operaciones, mientras que el método directo requiere  $\mathcal{O}(N^2)$  operaciones [19].

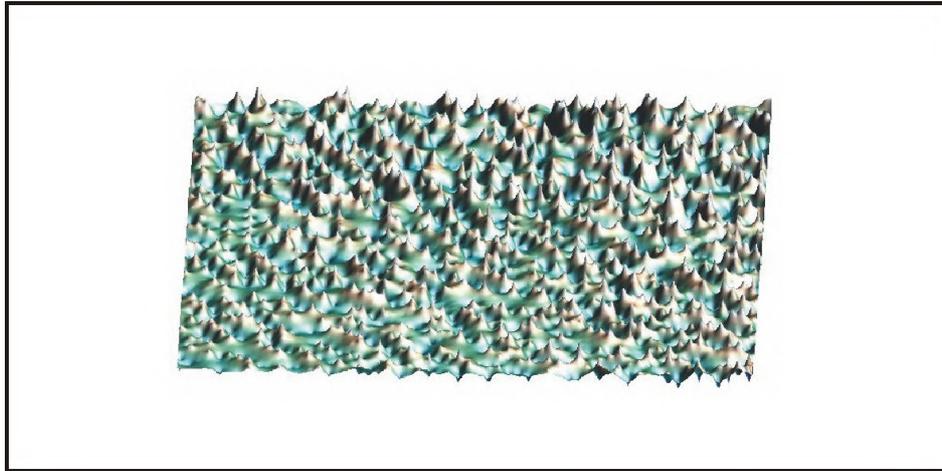
El criterio utilizado para disminuir al mínimo el tamaño de grilla radica, en este caso, en que no puede haber más de un punto de control en el mismo pixel de la nueva grilla menos densa. Una vez que se ha determinado cuáles son las dimensiones de la menor grilla posible, se aplican sobre ésta las ecuaciones (10) y (11) hasta que se cumple la condición de convergencia (12). Luego, si denotamos con la letra  $f$  a la grilla más fina y con la letra  $g$  a la más gruesa, se refina la grilla haciendo

$$\begin{aligned} f_{2i,2j} &= g_{i,j} \\ f_{2i,2j+1} &= g_{i,j} \\ f_{2i+1,2j} &= g_{i,j} \\ f_{2i+1,2j+1} &= g_{i,j} \end{aligned} \quad (13)$$

y se itera nuevamente sobre esta grilla hasta alcanzar convergencia. El procedimiento se repite hasta que se ha alcanzado la solución sobre la grilla original.

La convergencia lenta del esquema de Gauss Seidel puede explicarse porque en cada iteración un pixel recibe información solamente de sus vecinos y de esta manera la misma se propaga muy lentamente a todo el dominio. La virtud del esquema multigrilla radica en que, al iterar sobre la grilla de menores dimensiones, permite que la información se propague más rápidamente. Luego, en la medida en que se calcula sobre grillas más finas, el algoritmo solamente suaviza los bordes, alcanzando rápidamente

convergencia. La figura 3.10 muestra la superficie de corrección obtenida para un caso típico.



*Figura 3.10 Superficie de corrección puntual para un caso típico.*

Estos métodos propuestos forman en conjunto una herramienta práctica para ajustar modelos construidos por interferometría y fueron implementados computacionalmente en el programa DemToolbox, programado en lenguaje C++. Una ventaja de esta herramienta es la flexibilidad, que permite aplicar los algoritmos descritos en distinto orden según las necesidades del caso particular. Esta herramienta es utilizada con regularidad y ha dado buenos resultados en casos de aplicación, tal como se verá en el capítulo siguiente.

En el capítulo IV de esta tesis se analizarán aplicaciones de las técnicas descritas a casos de interés real. Allí podrá verse cómo distintas combinaciones de los algoritmos desarrollados permiten resolver problemas de diversa naturaleza en zonas con características disímiles.

# 4

## **ESTUDIO DE CASOS DE APLICACIÓN**

En este capítulo se presentan dos aplicaciones reales de las técnicas analizadas en los puntos anteriores. Las mismas tienen características y requerimientos diferentes, ya que una estudia una zona montañosa y la otra una zona de llanuras. En primer lugar se incluye la construcción de un MDE del área Gan Gan – Cañadón Asfalto, ubicada en el centro-norte de la Provincia del Chubut. Luego se presenta la construcción de un MDE de la cuenca del arroyo Azul en la Provincia de Buenos Aires, destinado a servir de soporte a estudios de inundaciones.

Las regiones elegidas para los estudios mencionados presentan características físicas y geográficas totalmente disímiles. Mientras que la primera (Chubut) se encuentra en una región de características desérticas, con muy poca vegetación y relieve de origen volcánico, la segunda (Azul) está enclavada en el centro de la pampa húmeda, con elevada cantidad de precipitaciones, siendo una zona de cultivo de granos y pasturas por excelencia. Otra importante diferencia entre ambas zonas es el relieve, ya que la primera es montañosa con importantes desniveles, y la segunda es principalmente llana. Estas características plantean problemas de distinta naturaleza para la reconstrucción de la topografía.

### **MDE Chubut**

#### **Ubicación geográfica del área**

El área de estudio está ubicada en la Provincia del Chubut, entre los paralelos 41°59'S y 43°2'S y entre los meridianos 68°56'W y 67°32'W. Comprende un área de aproximadamente 100km por 100km de extensión.



Figura 4.1 Zona de interés Gan Gan – Cañadón Asfalto. Ubicación dentro de la Provincia del Chubut<sup>4</sup>.

### Características fisiográficas

El relieve predominante es montañoso de origen volcánico, con elevaciones del orden de los 900m sobre el elipsoide en la Pampa de Gan Gan (centro del área, ver figura 4.2), y de 1900m en las zonas de mayor elevación. La región comprende una zona central relativamente llana (Pampas de Sacanana y Gan Gan), alineada en dirección Este – Oeste, limitada al Norte por las Sierras Piré Mahuida (Nevada) y Talagapa y al Sur por la Sierra de los Chacays. La esquina Noreste del área de interés comprende parte de la Sierra Apas.

La región es de origen volcánico, y está surcada por extensas coladas que descienden de los volcanes ubicados en las sierras nombradas en el párrafo anterior. No hay ríos importantes dentro del área de interés. Solamente existen pequeños arroyos que alimentan las lagunas someras Gan Gan y Verde, ubicadas en la zona central del área. Numerosos ríos secos y cañadones descienden de las zonas más elevadas a la altiplanicie central.

Las precipitaciones son escasas y prácticamente toda el área de interés está cubierta por vegetación rala de tipo arbustivo. El único asentamiento humano de tamaño considerable es Gan Gan y la principal actividad de la zona es la cría de ganado ovino. Actualmente, la región está siendo estudiada con fines de prospección petrolera.

La existencia de suelos secos y rocosos, escasa vegetación y raras precipitaciones hacen que la configuración de los elementos reflectores sea particularmente estable en el tiempo, y por lo tanto apta para la aplicación de interferometría de radar. Un factor que puede resultar problemático es la existencia de pendientes pronunciadas en regiones de relieve importante, lo cual lleva a pérdida de coherencia interferométrica.

<sup>4</sup> Mapa extraído del Atlas del Instituto Geográfico Militar.

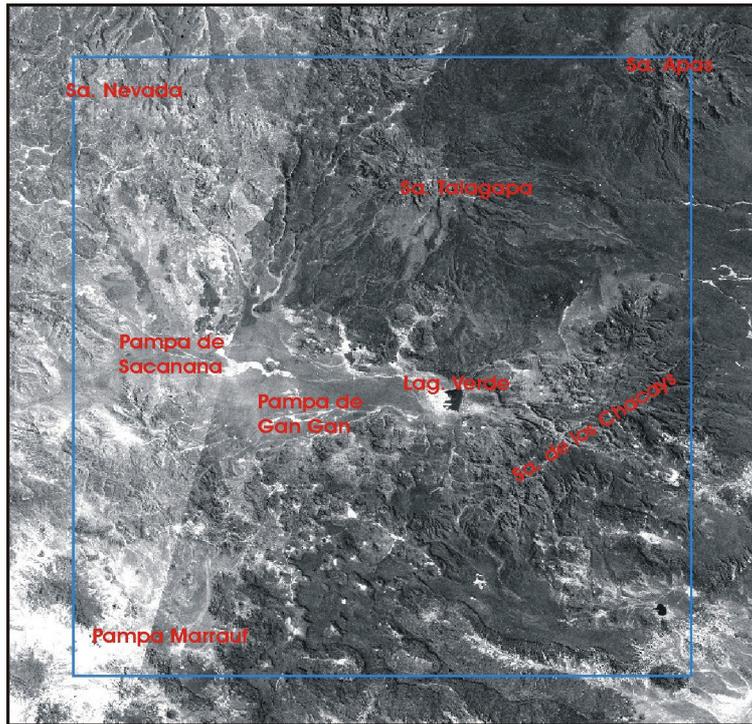


Figura 4.2 Rasgos principales de la zona Gan Gan – Cañadón Asfalto identificados sobre una imagen Landsat 7 pancromática.

### Información Utilizada

El área de interés resulta cubierta por cuatro pares interferométricos de los satélites ERS-1 y ERS-2, tal como se muestra en la figura 4.3.

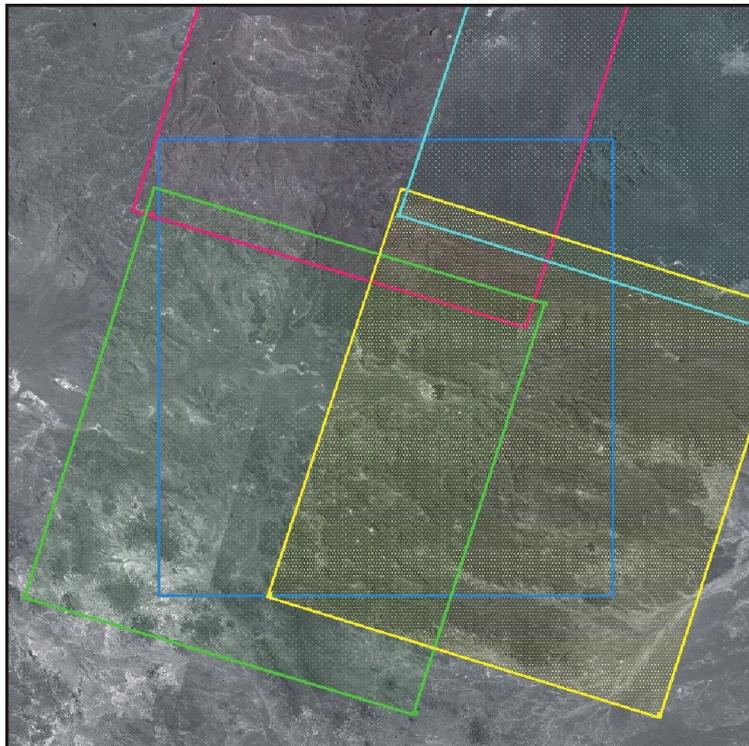


Figura 4.3 Cobertura de las imágenes de radar. En color azul se ve el límite del Área de Interés, y en colores verde, rojo, celeste y amarillo los cuatro pares que cubren la zona.

La Tabla 4-I presenta los datos de las imágenes utilizadas. Las mismas fueron adquiridas a Eurimage en formato SLC (Single Look Complex).

**TABLA 4-I**  
**IMÁGENES SAR UTILIZADAS PARA CONSTRUIR EL MDE CHUBUT**

<b>PAR 1 – 110-4455</b>					
<b>Satélite</b>	<b>Órbita</b>	<b>Centro</b>		<b>Fecha</b>	<b>Nivel de Proces.</b>
ERS 1	24146	Lat -41.831 S	Lon -68.180 W	26-Feb-1996	SLCI
ERS 2	4473	Lat -41.827 S	Lon -68.175 W	27-Feb-1996	SLCI

<b>PAR 2 – 110-4473</b>					
<b>Satélite</b>	<b>Órbita</b>	<b>Centro</b>		<b>Fecha</b>	<b>Nivel de Proces.</b>
ERS 1	24146	Lat -42.701 S	Lon -68.549 W	26-Feb-1996	SLCI
ERS 2	4473	Lat -42.697 S	Lon -68.544 W	27-Feb-1996	SLCI

<b>PAR 3 – 339-4455</b>					
<b>Satélite</b>	<b>Órbita</b>	<b>Centro</b>		<b>Fecha</b>	<b>Nivel de Proces.</b>
ERS 1	24375	Lat -41.832 S	Lon -67.456 W	13-Mar-1996	SLCI
ERS 2	4702	Lat -41.825 S	Lon -67.449 W	14-Mar-1996	SLCI

<b>PAR 4 – 339-4473</b>					
<b>Satélite</b>	<b>Órbita</b>	<b>Centro</b>		<b>Fecha</b>	<b>Nivel de Proces.</b>
ERS 1	24375	Lat -42.702 S	Lon -67.824 W	13-Mar-1996	SLCI
ERS 2	4702	Lat -42.695 S	Lon -67.817 W	14-Mar-1996	SLCI

## Procesamiento interferométrico

El procesamiento interferométrico consta de una serie de etapas que deben ser superadas exitosamente para obtener finalmente el MDE.

1. Ingestión de datos. Consiste en la carga y preparación de las imágenes por parte del procesador interferométrico.
2. Corregistración de los pares de imágenes. Consiste en hacer coincidir las imágenes que componen un par, con una precisión mínima de 1/8 de píxel.
3. Generación de interferograma y mapa de coherencia. Cálculo de la diferencia de fase píxel a píxel y de la coherencia en ventanas de tamaño variable.
4. Desenrollado de fase. Esta etapa fue particularmente problemática en las zonas de relieve abrupto (zonas de sierras del área de interés). Esto es debido a que dichas regiones son en general de coherencia muy baja y fase ruidosa.
5. Conversión de fase a cotas. Se aplican los parámetros sacados de la geometría de adquisición para traducir los valores de fase desenrollada en diferencias de altura.

Este procesamiento dio como resultado la obtención de 4 MDEs que cubren la zona de interés en su totalidad y conservan regiones de superposición entre sí. La Figura 4.4 muestra estos resultados. A partir de este punto se utilizará la nomenclatura numérica de dicha figura para aludir a la parte del MDE proveniente de cada par interferométrico.

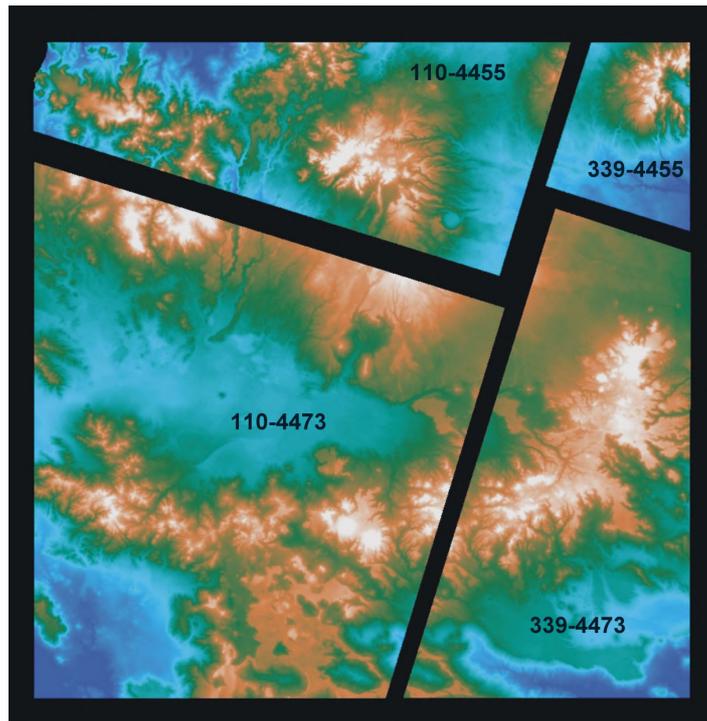


Figura 4.4 MDEs provenientes de los cuatro pares interferométricos utilizados para cubrir la zona de interés en su totalidad. La nomenclatura numérica corresponde al track y frame de cada par interferométrico.

### Conjunto de datos de corrección y validación

Durante la realización del trabajo se dispone de distintos conjuntos de puntos de control para efectuar las correcciones. Los tres conjuntos están dispuestos como:

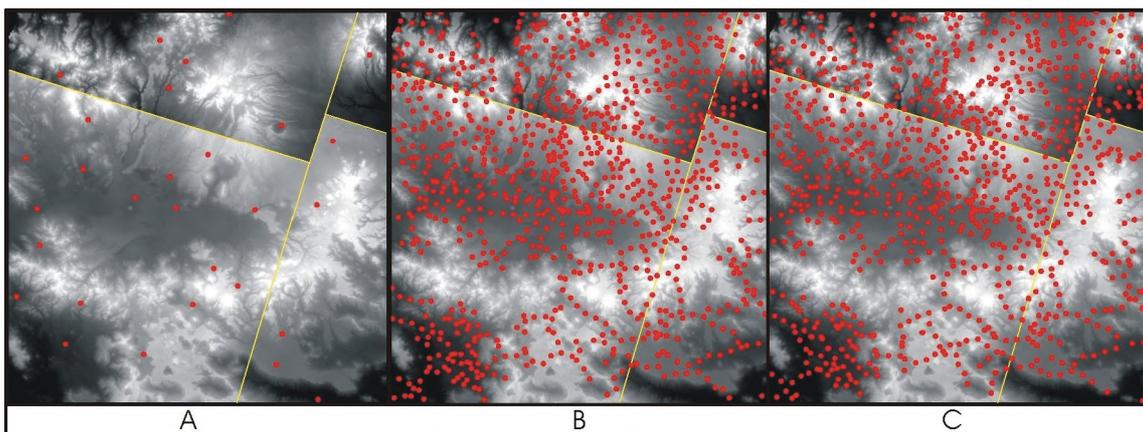


Figura 4.5 Distribución de puntos de control sobre el Área de Interés. A) Conjunto n°1 (31 puntos), B) Conjunto n° 2 (907 puntos de corrección), C) Conjunto n°3 (904 puntos de validación)

1. 31 puntos medidos con técnica de GPS diferencial, distribuidos espacialmente según indica la figura 4.5A.
2. 907 puntos medidos con técnica de GPS diferencial durante las campañas de estudios de gravimetría (Figura 4.5B).

3. 904 puntos medidos con técnica de GPS diferencial durante las campañas de estudios de gravimetría (Figura 4.5C). Este conjunto (distinto del número 2) no se utiliza en las etapas de corrección y se reserva para validar los resultados obtenidos.

## Unión y corrección de los MDEs

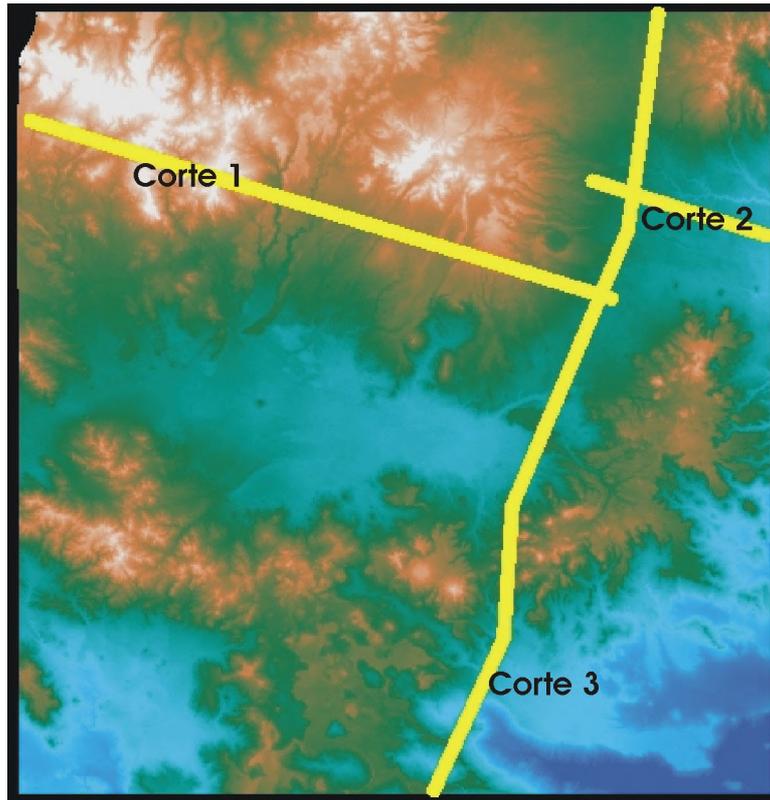
El caso analizado presenta un doble problema: por una parte es necesario corregir y ajustar los MDE para que constituyan una representación fiel de la realidad, y por otra parte se debe realizar la unión de las zonas correspondientes a los cuatro pares originales.

Es preciso distinguir dos categorías de uniones: 1) uniones entre imágenes provenientes de una misma pasada del satélite, y 2) uniones entre imágenes provenientes de pasadas contiguas. En el caso 1, la pasada se corta en *frames* en las instalaciones de producción con fines de procesamiento y distribución, pero la geometría de adquisición no varía sustancialmente entre una imagen y la siguiente. Esto implica que es esperable que los datos de topografía mantengan una continuidad. En el caso 2, en cambio, la órbita desde las cuales se han producido las adquisiciones son distintas, o sea que la geometría de adquisición es distinta y por lo tanto pueden existir serias ambigüedades en la topografía. En el caso que nos ocupa son dos las pasadas del satélite involucradas, y están compuestas una de ellas por las escenas correspondientes al *track* 110 y la otra por las correspondientes al *track* 339 (ver figura 4.4).

La solución a este problema se aproxima utilizando una de las partes en que se divide la zona de interés como base, y ajustando las restantes a ella. En primer lugar se eligen como base las porciones con mayor cobertura, esto es los MDEs 110-4473 y 339-4473, y se produce la unión de las partes correspondientes a una misma pasada del satélite.

El procedimiento seguido es el siguiente:

1. A las porciones base (esto es 110-4473 y 339-4473) se las corrige con los algoritmos de desplazamiento rígido en cota e inclinación, descritos en el capítulo anterior. Para realizar dichas correcciones se utilizan los puntos del conjunto n°1 del párrafo anterior.
2. En la zona de superposición entre porciones se extraen puntos de la porción tomada como base (esto es 110-4473 y 339-4473).
3. Se utilizan los puntos extraídos en el punto 2 más los puntos del conjunto n°1 del párrafo anterior para aplicar el algoritmo de desplazamiento en *xy* a las porciones 110-4455 y 339-4455. Esto permite ajustar de la mejor manera en base a la información disponible la georreferenciación relativa de los MDEs provenientes de los distintos pares interferométricos.
4. Se utilizan los puntos extraídos en el punto 2 más los puntos del conjunto n°1 del párrafo anterior para aplicar los algoritmos de desplazamiento rígido, inclinación e Interpolación Lineal Filtrada a las porciones 110-4455 y 339-4455.
5. Se efectúa la unión de cada pasada asignando un promedio en la zona de superposición.



*Figura 4.6 Traza de perfiles extraídos sobre las zonas de unión de las diferentes partes que componen el MDE Chubut final.*

Para ver más claramente la efectividad de este procedimiento y los resultados obtenidos, se extraen perfiles de las zonas de superposición según el diagrama de la figura 4.6. La figura 4.7 muestra la evolución de los errores sobre el Corte 1, que corresponde a la unión entre las partes 110-4455 y 110-4473 del MDE. El primer gráfico de la misma (4.7A) representa los perfiles de ambas partes corregidas solamente con el algoritmo de desplazamiento en z calculado con mínimos cuadrados. Puede notarse claramente que existe un corrimiento, especialmente notable en las zonas inicial y final del perfil. Este efecto es corregido mediante el algoritmo de inclinación rígida, aplicado también en ambas partes del MDE (4.7B). El efecto del algoritmo de Interpolación Lineal Filtrada sobre la zona de superposición es mínimo (4.7C).

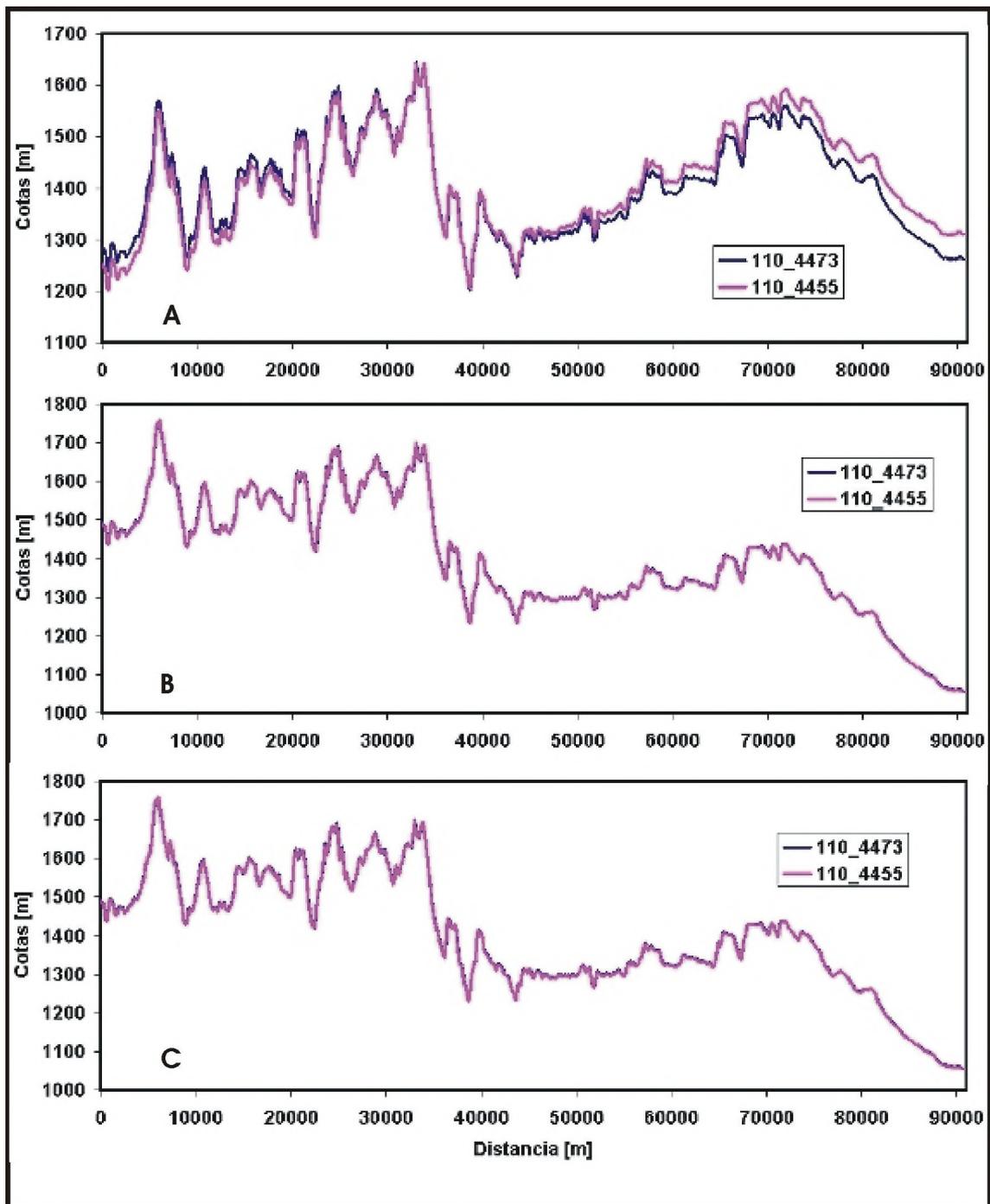


Figura 4.7 Evolución de los errores en la zona de superposición entre las partes del MDE denominadas 110-4473 y 110-4455 (correspondiente al corte 1 de la figura anterior). A) Situación después de la corrección con el algoritmo de mínimos cuadrados, B) Situación después de la corrección con el algoritmo de inclinación rígida, C) Situación después de la corrección con el algoritmo de Interpolación Lineal Filtrada.

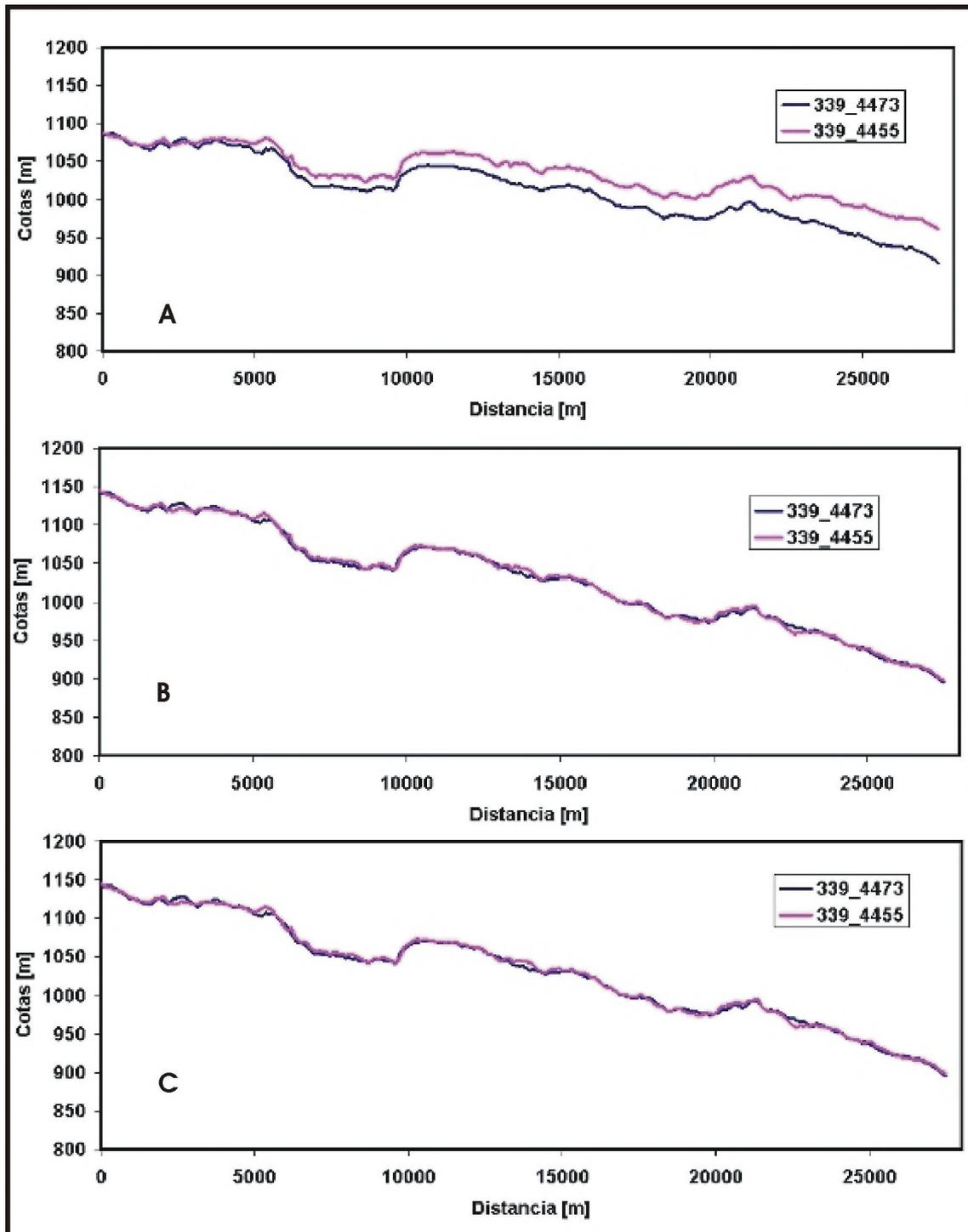


Figura 4.8 Evolución de los errores en la zona de superposición entre las partes del MDE denominadas 339-4473 y 339-4455 (correspondiente al corte 2 de la figura anterior). A) Situación después de la corrección con el algoritmo de mínimos cuadrados, B) Situación después de la corrección con el algoritmo de inclinación rígida, C) Situación después de la corrección con el algoritmo de Interpolación Lineal Filtrada.

La figura 4.8 representa los perfiles extraídos según el Corte 2, en la unión entre las partes 339-4455 y 339-4473 del MDE. La evolución es análoga a la descrita en el párrafo precedente, es decir que los perfiles muestran una clara diferencia luego de corregidos rígidamente en  $z$  (4.8A). Posteriormente, la inclinación rígida soluciona en

gran parte la divergencia (4.8B) y también en este caso es mínimo el efecto del algoritmo de Interpolación Lineal Filtrada sobre la zona de superposición (4.8C)

La etapa de trabajo descrita se realizó utilizando el conjunto de puntos 1 antes detallado. Este conjunto de puntos no es muy bueno, ya que deja grandes zonas del área de interés sin cobertura. Además, como puede verse en la figura 4.5A, sobre la pasada ubicada al este (339) caen muy pocos puntos. El motivo de hacerlo así es que no se disponía de mejor información al momento en que esta parte del trabajo se estaba llevando a cabo.

En una segunda etapa de trabajo, se dispone de los puntos del conjunto n° 2 descrito en el párrafo anterior. Con este conjunto de puntos se encara la corrección restante y la unión de las dos pasadas contiguas. El procedimiento utilizado es el siguiente:

1. Aplicación del algoritmo de Interpolación Lineal Filtrada a ambas regiones por separado. Esto se hace utilizando los puntos del conjunto 2 antes mencionado.
2. Cálculo de las ambigüedades de altura existentes sobre el área de superposición. El mapa de ambigüedades puede verse en la figura 4.10C y será explicado más adelante.
3. En base al mapa de ambigüedades se traza una poligonal de corte, de manera de que la unión se produzca en zonas de error bajo. Esta poligonal se trazó manualmente para este caso.
4. Se recortan las partes sobre las líneas de corte, dejando una zona de superposición mínima.
5. Se efectúa la unión asignando un promedio en la zona de superposición.
6. Se aplica la interpolación lineal filtrada al área completa utilizando el conjunto de puntos 2.

La figura 4.9 representa la evolución del error extraído sobre el Corte 3 (figura 4.6). El primer gráfico (4.9A) muestra la unión tal y como ha quedado después de corregir y unir por separado las partes correspondientes a cada pasada (es decir, 110-4455 con 110-4473 y 339-4455 con 339-4473). Pueden notarse las diferencias en varias zonas del perfil. El segundo gráfico (4.9B) muestra la situación posterior a la aplicación de la Interpolación Lineal Filtrada en ambas partes (110 y 339). En este caso la corrección por medio de este algoritmo tiene un efecto notable.

Puede notarse por el diferente procedimiento utilizado que la unión de pasadas contiguas es más difícil que la de imágenes correspondientes a la misma pasada del satélite. Esto es debido a que la geometría de adquisición de la zona de superposición es muy distinta, tal como se ha detallado anteriormente. Es interesante notar que en el caso de las uniones dentro de la misma pasada (figuras 4.7 y 4.8) el algoritmo de inclinación rígida basta para resolver gran parte de las divergencias entre partes. Este hecho confirma la hipótesis de que la geometría de observación es muy similar, y entonces las ambigüedades provienen de errores en los parámetros interferométricos. Los casos presentados son atribuibles a estimación errónea de las componentes de la línea de base, tal como se ha detallado en el capítulo II de este trabajo.

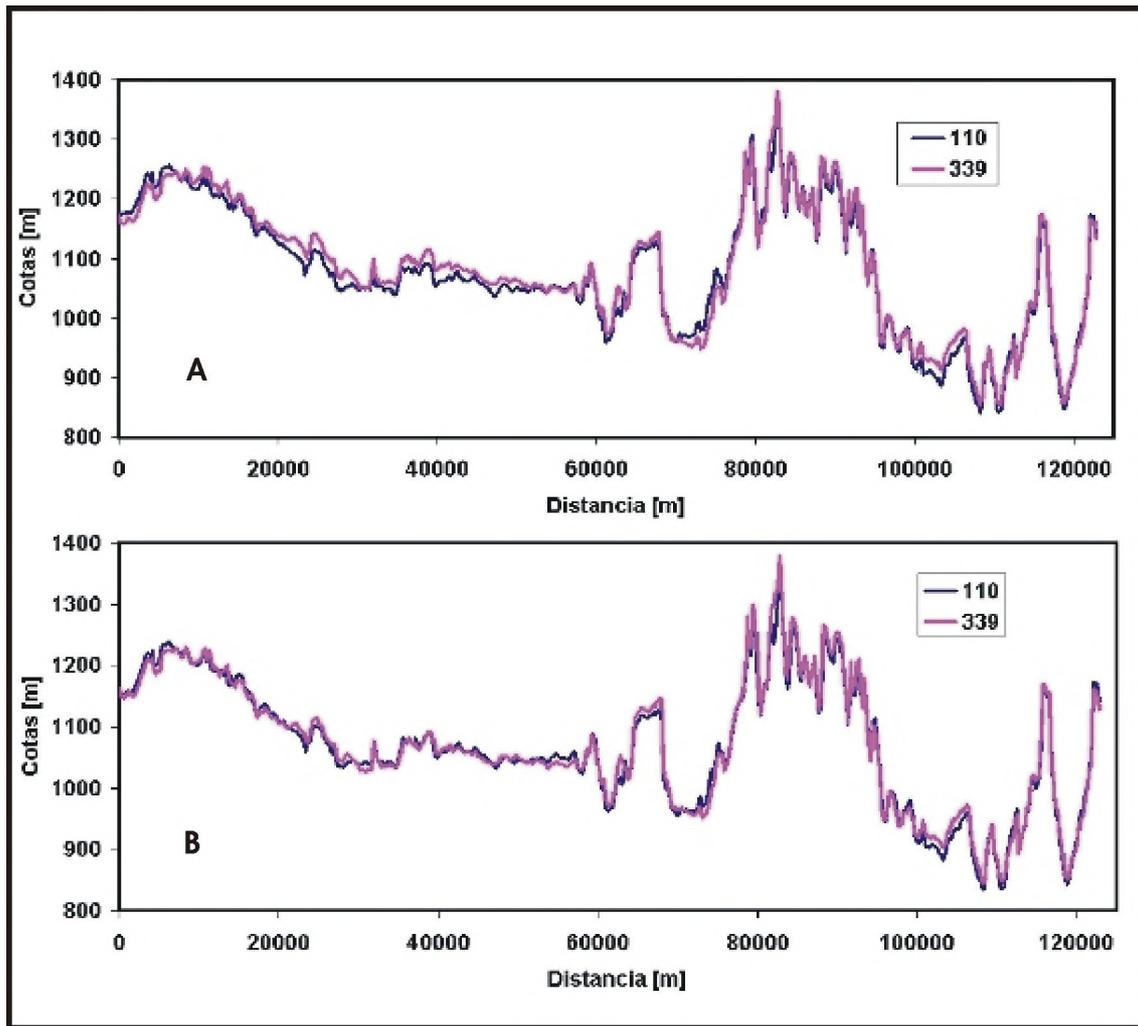


Figura 4.9 Evolución de los errores en la zona de superposición entre las dos pasadas denominadas 110 y 339, (correspondiente al corte 3 de la figura anterior). A) Situación emergente de las correcciones que se muestran en las figuras 4.7 y 4.8, B) Situación después de la corrección con el algoritmo de Interpolación Lineal Filtrada.

Otra manera de ver los resultados del procedimiento de unión realizado es calcular, pixel a pixel y sobre las zonas de superposición, la diferencia entre las dos partes que se están uniendo. Este procedimiento genera un mapa de diferencias y permite visualizar la distribución de ambigüedades sobre la zona de superposición. La figura 4.9 muestra dichos mapas sobre las tres zonas de unión del caso que nos ocupa, calculados con los MDE parciales en su etapa final antes de producirse la unión (es decir con los casos C de las figuras 4.7 y 4.8). En dicha figura también se muestran histogramas de los mapas de diferencias calculados; nótese que la línea diagonal que cruza los histogramas permite relacionar el valor del error, legible sobre el eje horizontal, con un código de colores legible sobre el eje vertical y sobre el mapa en sí. Los colores verdes y celestes indican un error cercano a 0 y por lo tanto son deseables, aunque quedan remanentes algunas zonas de error más elevado.

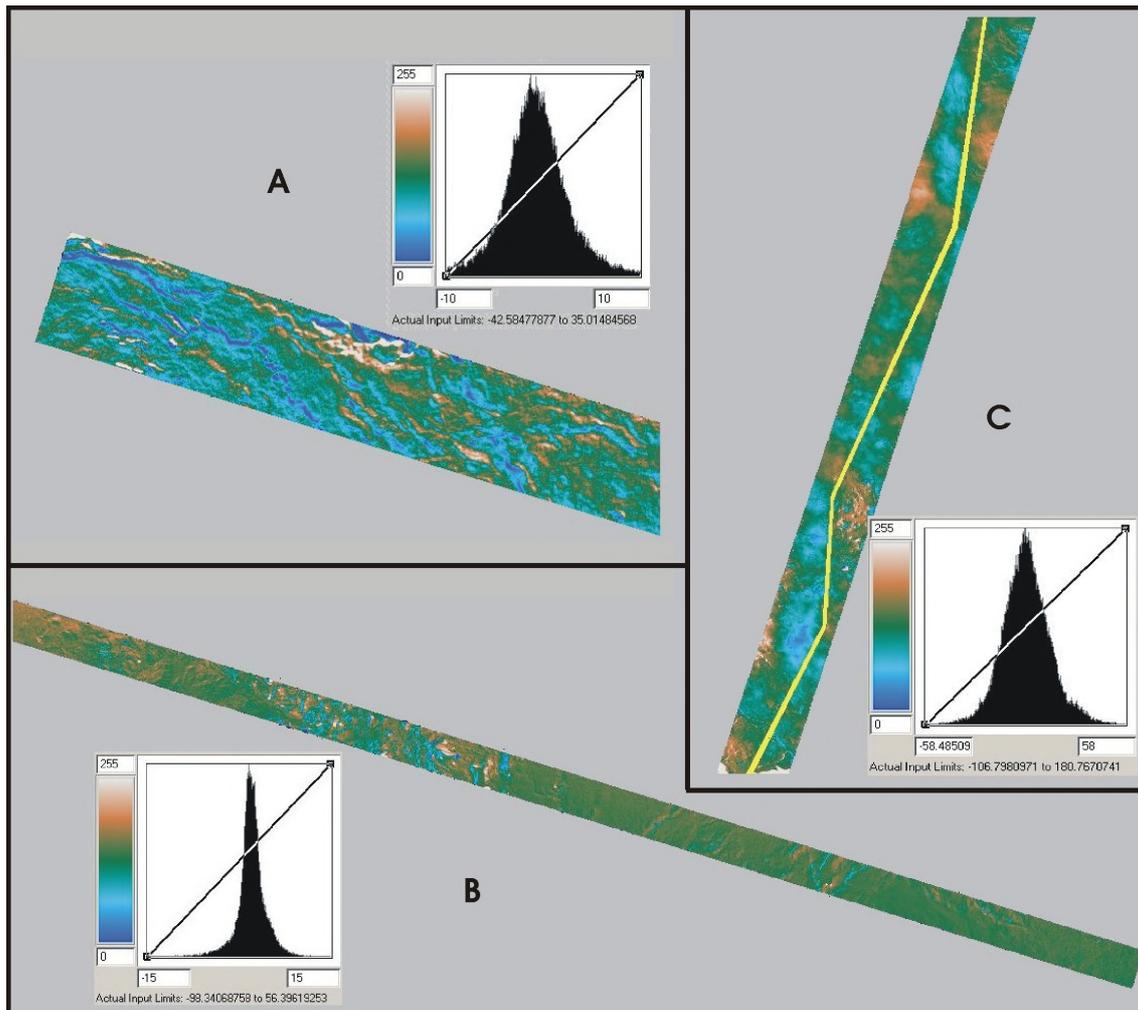


Figura 4.10 Zonas de superposición entre los distintos componentes del MDE. A) Unión 339-4455/4473, B) Unión 110-4455/4473, C) Unión 110/339. En el eje horizontal de los histogramas se representa la diferencia entre las cotas de los sectores superpuestos, en correspondencia con la codificación de colores del eje vertical y de las figuras (los valores son A)  $-10m$  a  $10m$ , B)  $-15m$  a  $15m$  y C)  $-58m$  a  $58m$ ). Puede observarse que las diferencias presentan en todos los casos una distribución muy cercana a la normal centrada en cero. En la unión entre diferentes pasadas (C) la situación es más compleja: el histograma presenta una desviación estándar más elevada que en los otros casos, y la línea de color amarillo indica el corte realizado tratando de seguir un camino de baja diferencia.

### Análisis de la evolución de los errores

Se utiliza el conjunto de puntos n°3 de la figura 4.5C para hacer un estudio de la evolución de los errores sobre las 4 partes separadas y el MDE final al aplicarles los distintos algoritmos descritos. Para la discusión siguiente es necesario recordar que los MDE se corrigieron en una primera fase con los puntos del conjunto n°1 (figura 4.5A), un conjunto de puntos mucho menor que el conjunto de validación que se está utilizando aquí.

Sector 110-4473. Inicialmente presenta un desplazamiento hacia cotas menores que las reales (Fig 4.11A), por lo que se le aplica un desplazamiento a la posición de mínimos cuadrados. La elevada media del error remanente (tabla 4-II), así como la desviación

estándar indican la presencia de deformaciones que son evidentes al ver la figura 4.11B. Persiste una inclinación muy importante en sentido Este-Oeste. La posterior corrección mediante un plano inclinado mejora los valores de error notablemente, llevando la media de  $-21.96\text{m}$  a  $0.47\text{m}$  y la desviación estándar de  $111.2\text{m}$  a  $12.3\text{m}$  (figura 4.11C)

Sector 339-4473. Inicialmente presenta un desplazamiento hacia valores de cota menores que los reales (fig 4.11D) y al aplicarle un desplazamiento rígido en cota se evidencia una inclinación de sentido Este-Oeste (fig 4.11E). En este caso la aplicación de la corrección por plano inclinado mejora los valores de desviación estándar ( $31.4\text{m}$  a  $12.6\text{m}$ ) pero empeora el valor de la media del error ( $-1.96\text{m}$  a  $-5.9\text{m}$ ). Este fenómeno es debido a la existencia de una deformación regional localizada principalmente en las esquinas Noroeste y Sudoeste del MDE, que aparecen elevadas con respecto a las cotas reales, tal como puede verse en la Fig 4.11F.

Sector 110-4455. Para la corrección de este sector, se utilizaron los puntos correspondientes del conjunto n° 1 y puntos extraídos en la zona de superposición con el sector 110-4473. Inicialmente presenta un desplazamiento a valores de cota menores que los reales (fig 4.12A). Se le aplica una corrección en el plano  $xy$  fundamentalmente para ajustarlo lo mejor posible al sector 110-4473, con el cual será unido en un paso siguiente (fig 4.12B). El desplazamiento en  $xy$  no provoca cambios sustanciales en los valores de estudio del error. Posteriormente se aplica un desplazamiento rígido en cota (fig 4.12C), que deja en evidencia la existencia de una inclinación de sentido Este-Oeste y que es removida utilizando una corrección por plano inclinado (fig 4.12D). Luego se aplica el algoritmo de Interpolación Lineal Filtrada, que da el resultado que muestra la figura 4.12E.

Sector 339-4455. Como puede verse en la figura 4.5A este sector contiene sólo un punto de control. Esto es a todas luces muy poco para obtener un ajuste aceptable del MDE. Sin embargo, en esta etapa sólo se desea adecuar la zona de superposición con el sector 339-4473, y para ello se usan puntos extraídos de este último en la zona de superposición y el único punto anteriormente citado. Inicialmente presenta un desplazamiento hacia cotas menores que las reales (fig 4.13A), que son corregidas con un desplazamiento en  $xy$  (para adecuarlo al sector 339-4473) y un desplazamiento en cota (fig 4.13B y C respectivamente). Es notable la persistencia de una inclinación en sentido Este-Oeste. Esta inclinación es modificada por el algoritmo de inclinación (fig 4.13D) y la Interpolación Lineal Filtrada (fig 4.13E), aunque no es removida totalmente.

En las figuras 4.14A y B se muestra la distribución de errores de las dos pasadas por separado, después de aplicarles la Interpolación Lineal Filtrada. Finalmente, luego de la unión de dichas pasadas, se realiza una nueva aplicación del algoritmo de Interpolación Lineal Filtrada, dando el resultado que puede verse en la figura 4.14C (tabla 4-II). Puede observarse que permanecen zonas de error relativamente alto en la esquina Noreste del MDE final, y en la zona sur. Este efecto tiene su explicación ya que dichas zonas son en general muy escarpadas y de baja coherencia, lo que dificultó en gran medida el desenrollado de fase.

**TABLA 4-II**  
**ERRORES SOBRE EL MDE CHUBUT**

<b>110-4473</b>						
	Original	Desp. xy	Mín. Cuadrados	Plano Inclinado	Interp. Lineal Filtrada (ILF)	
Media	1213.7	--	-21.96	0.47	--	
Desv. Estándar	111.2	--	111.2	12.3	--	
Máx (-)	1000.2	--	-235.4	-34.2	--	
Máx (+)	1451.9	--	216.2	34.2	--	

<b>339-4473</b>						
	Original	Desp. xy	Mín. Cuadrados	Plano Inclinado	Interp. Lineal Filtrada (ILF)	
Media	609.8	--	-1.96	-5.9	--	
Desv. Estándar	31.4	--	31.4	12.6	--	
Máx (-)	500.3	--	-111.5	-45.1	--	
Máx (+)	669.5	--	57.7	23.6	--	

<b>110-4455</b>						
	Original	Desp. xy	Mín. Cuadrados	Plano Inclinado	Interp. Lineal Filtrada (ILF)	
Media	1372.6	1372.7	-67.9	-6.9	-6.6	
Desv. Estándar	142.5	142.2	142.2	12.4	12.5	
Máx (-)	1160.9	1162.5	-278.1	-33.6	-33.6	
Máx (+)	1702.5	1704.2	263.6	32.9	33.6	

<b>339-4455</b>						
	Original	Desp. xy	Mín. Cuadrados	Plano Inclinado	Interp. Lineal Filtrada (ILF)	
Media	1283.1	1282.7	-11.7	-15.6	-15.5	
Desv. Estándar	28.9	31.4	31.4	17.5	17.5	
Máx (-)	1223.1	1216.4	-77.9	-53.5	-53.5	
Máx (+)	1343.8	1342.7	48.3	39.4	39.4	

<b>Unión 110</b>						
	Original	Desp. xy	Mín. Cuadrados	Plano Inclinado	Interp. Lineal Filtrada (ILF)	
Media	--	--	--	--	0.1	
Desv. Estándar	--	--	--	--	9.0	
Máx (-)	--	--	--	--	-31.7	
Máx (+)	--	--	--	--	31.9	

<b>Unión 339</b>						
	Original	Desp. xy	Mín. Cuadrados	Plano Inclinado	Interp. Lineal Filtrada (ILF)	
Media	--	--	--	--	0.3	
Desv. Estándar	--	--	--	--	10.1	
Máx (-)	--	--	--	--	-31.8	
Máx (+)	--	--	--	--	57.6	

<b>MDE Completo</b>						
	Original	Desp. xy	Mín. Cuadrados	Plano Inclinado	Interp. Lineal Filtrada (ILF)	
Media	--	--	--	--	0.17	
Desv. Estándar	--	--	--	--	9.3	
Máx (-)	--	--	--	--	-31.8	
Máx (+)	--	--	--	--	57.6	

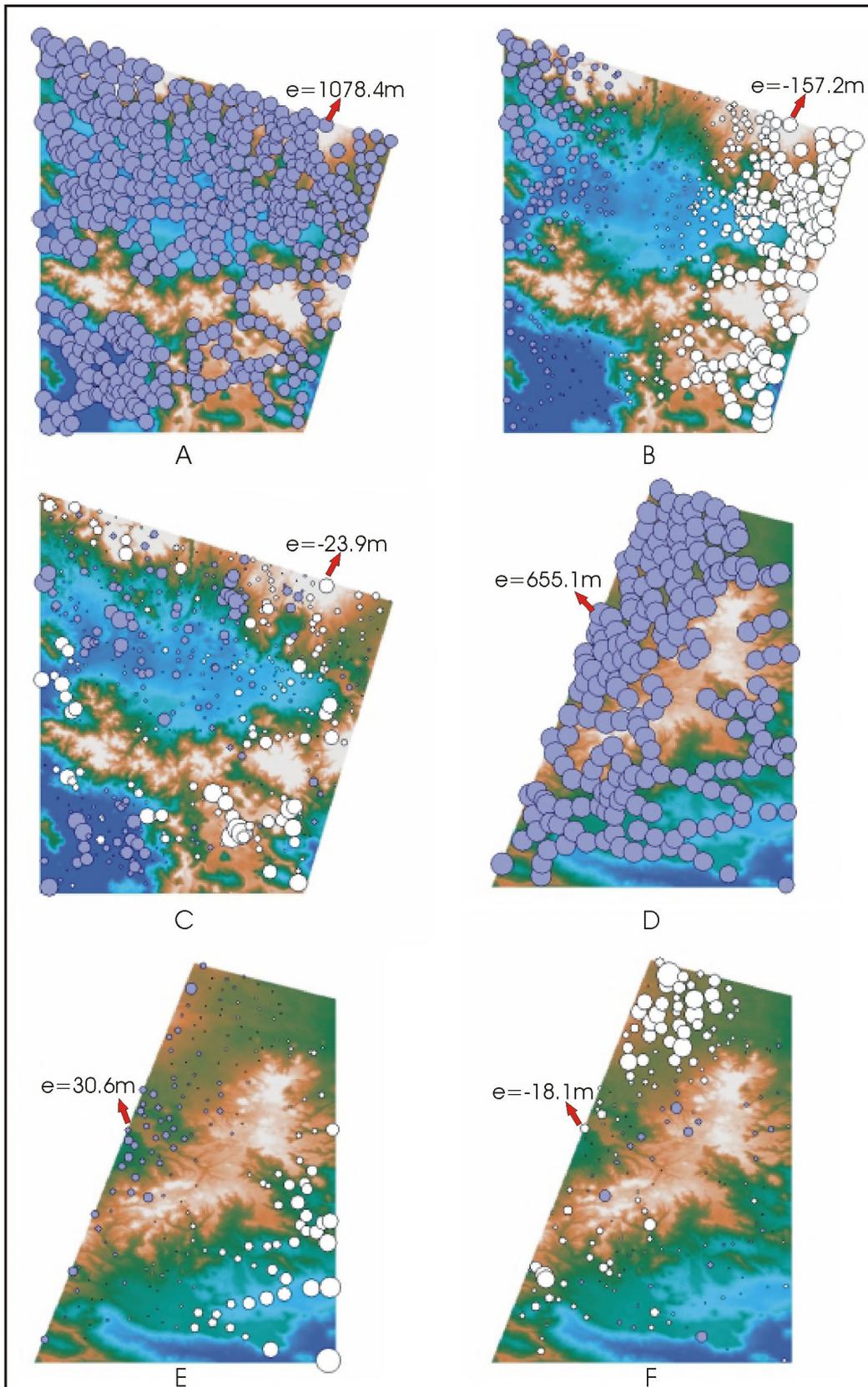


Figura 4.11 Evolución de los errores sobre zonas del MDE. Los puntos azules representan valores positivos, los puntos blancos representan valores negativos y se ha indicado en cada caso un valor para dar idea de la magnitud. A,B,C) Sector 110-4473 original y después de haber sido corregido con Mínimos Cuadrados e Inclinación respectivamente. D,E,F) Idem para el sector 339-4473

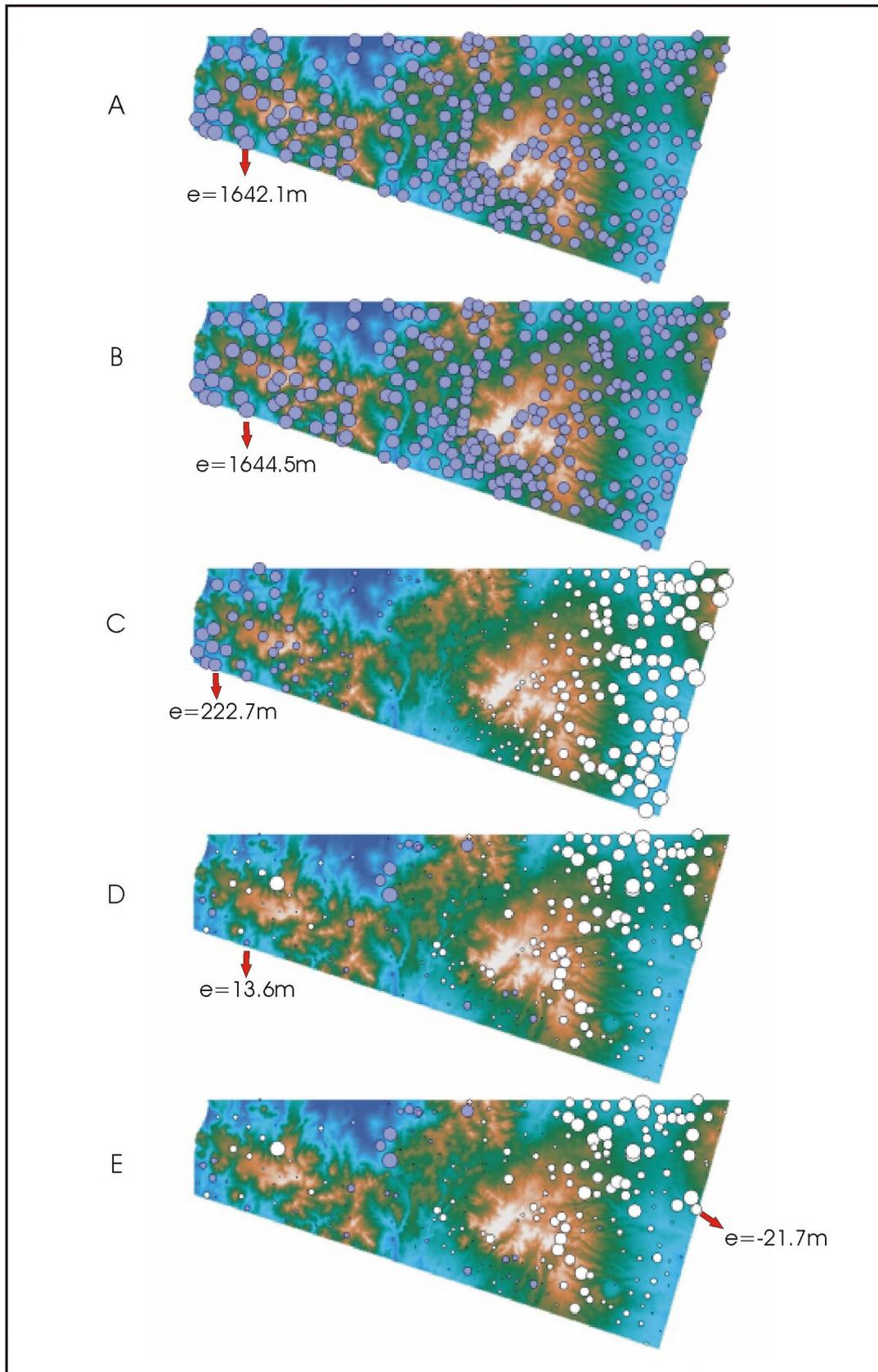


Figura 4.12 Evolución de los errores sobre zonas del MDE. A,B,C,D,E) Zona 110-4455 original y después de haber sido corregida con Mínimos Cuadrados, Desplazamiento xy, Inclinación e Interpolación Lineal Filtrada respectivamente.

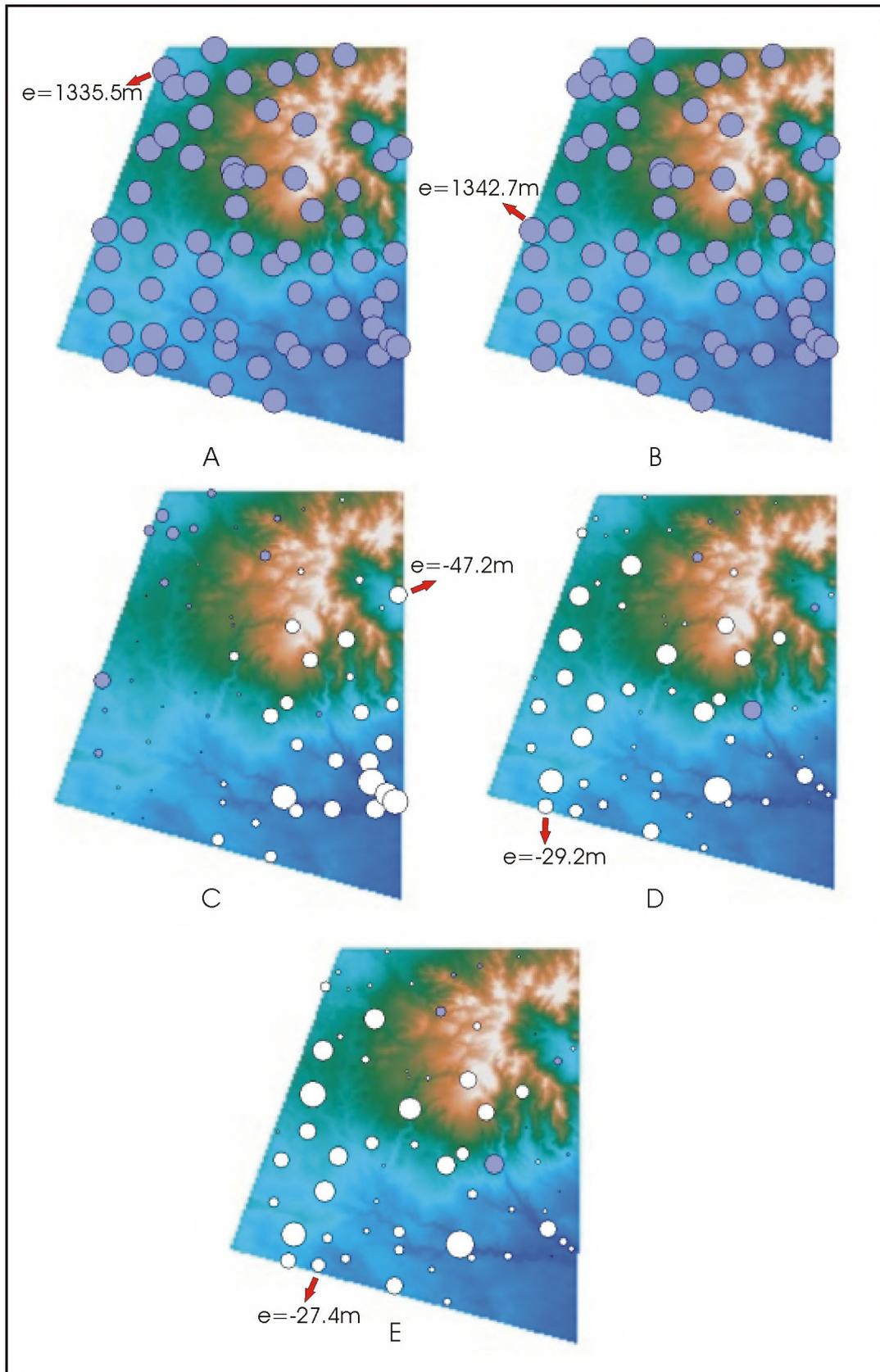


Figura 4.13 Evolución de los errores sobre zonas del MDE. A,B,C,D,E) Zona 339-4455 original y después de haber sido corregida con Mínimos Cuadrados, Desplazamiento xy, Inclinación e Interpolación Lineal Filtrada respectivamente.

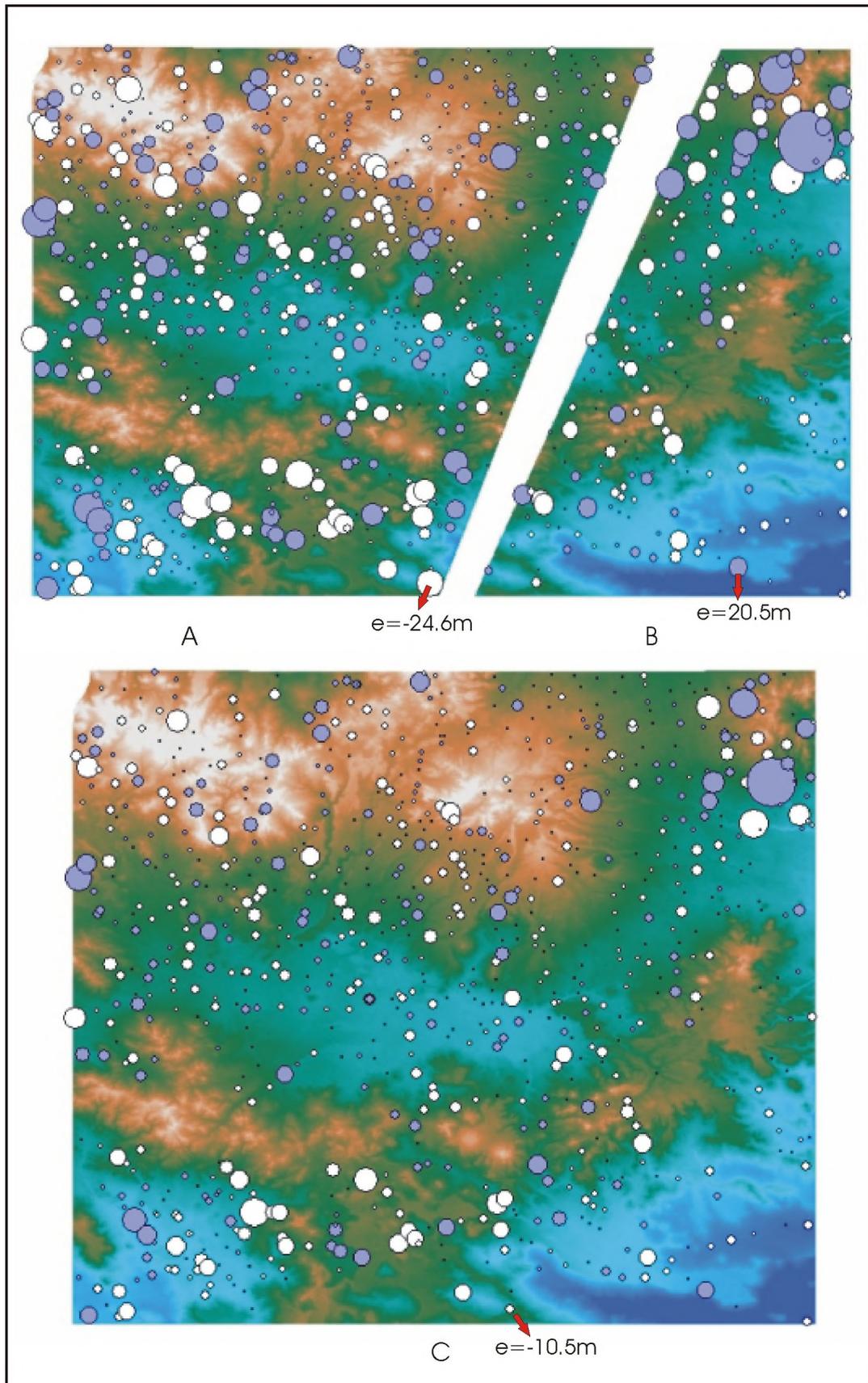


Figura 4.14 Errores sobre partes del MDE. A,B) Uniones 110 y 339 respectivamente después de la Interpolación Lineal Filtrada. C) MDE completo después de ser corregido con el algoritmo de Interpolación Lineal Filtrada.

Para finalizar con el análisis de los errores sobre el MDE Chubut, se presenta la comparación de algunos perfiles medidos sobre el terreno con el MDE. La figura 4.15 muestra tres de estas trazas, tomadas en diferentes posiciones dentro del área de interés. En la misma (centro arriba) puede verse la ubicación de las trazas sobre la superficie del MDE, y para cada una de ellas la traza sobre una imagen Landsat 7 de la zona de interés. Los perfiles muestran la comparación entre las cotas medidas con GPS (en color azul) y las cotas del MDE (rosado).

El track 1 comienza en las zonas elevadas de la Sierra Nevada y desciende por la Pampa de Sacanana hacia la Pampa de Gan Gan. El ajuste es bueno, excepto por discrepancias hacia el final del perfil, con una media de error de  $-0.6\text{m}$  y una desviación estándar de  $7.7\text{m}$ . Es necesario observar que hacia la parte más baja del trazado, el perfil medido en campo es más suave que el perfil extraído del MDE. Esto ocurre en ciertos casos debido a que el camino se desarrolla de manera tal de minimizar los desniveles, pero el MDE integra la información de un área más amplia (recuérdese que el pixel del MDE es de  $20\text{m} \times 20\text{m}$ ). Esto implica que la comparación de un perfil lineal medido sobre un camino deberá ser comúnmente más suave. En esta zona en particular, se observa que el camino discurre vecino a un cauce seco, alejándose y acercándose al mismo, lo cual explica el aspecto del perfil extraído del MDE.

El track 2 discurre sobre uno de los flancos de la Sierra de Talagapa, descendiendo hacia Gan Gan. Este perfil muestra, en una transición entre las zonas más elevadas del MDE y los llanos centrales, un ajuste muy bueno, con una media de  $-2.4\text{m}$  y una desviación estándar de  $5.4\text{m}$ .

El track 3 está ubicado en el extremo sureste, sobre el borde del área de interés, y atraviesa la bajada desde la meseta al sur de la Sierra de los Chacays a los llanos ubicados hacia el sureste. La media del error es de  $-9.3\text{m}$  y la desviación estándar de  $5.8\text{m}$ . Puede observarse una desviación del perfil del MDE con respecto al medido en campo, de signo y magnitud estable a lo largo de casi todo el mismo. Esto se debe a que el perfil se halla sobre el borde del área de interés, en una zona donde hay pocos puntos de corrección.

Los tres ejemplos presentados aquí son parte de un conjunto de 33 perfiles que se utilizaron para evaluar la calidad del MDE generado, no detallados aquí por motivos de espacio. En ellos puede observarse que la forma del MDE construido y ajustado representa en forma suficientemente fiel la superficie real, medida en campo.

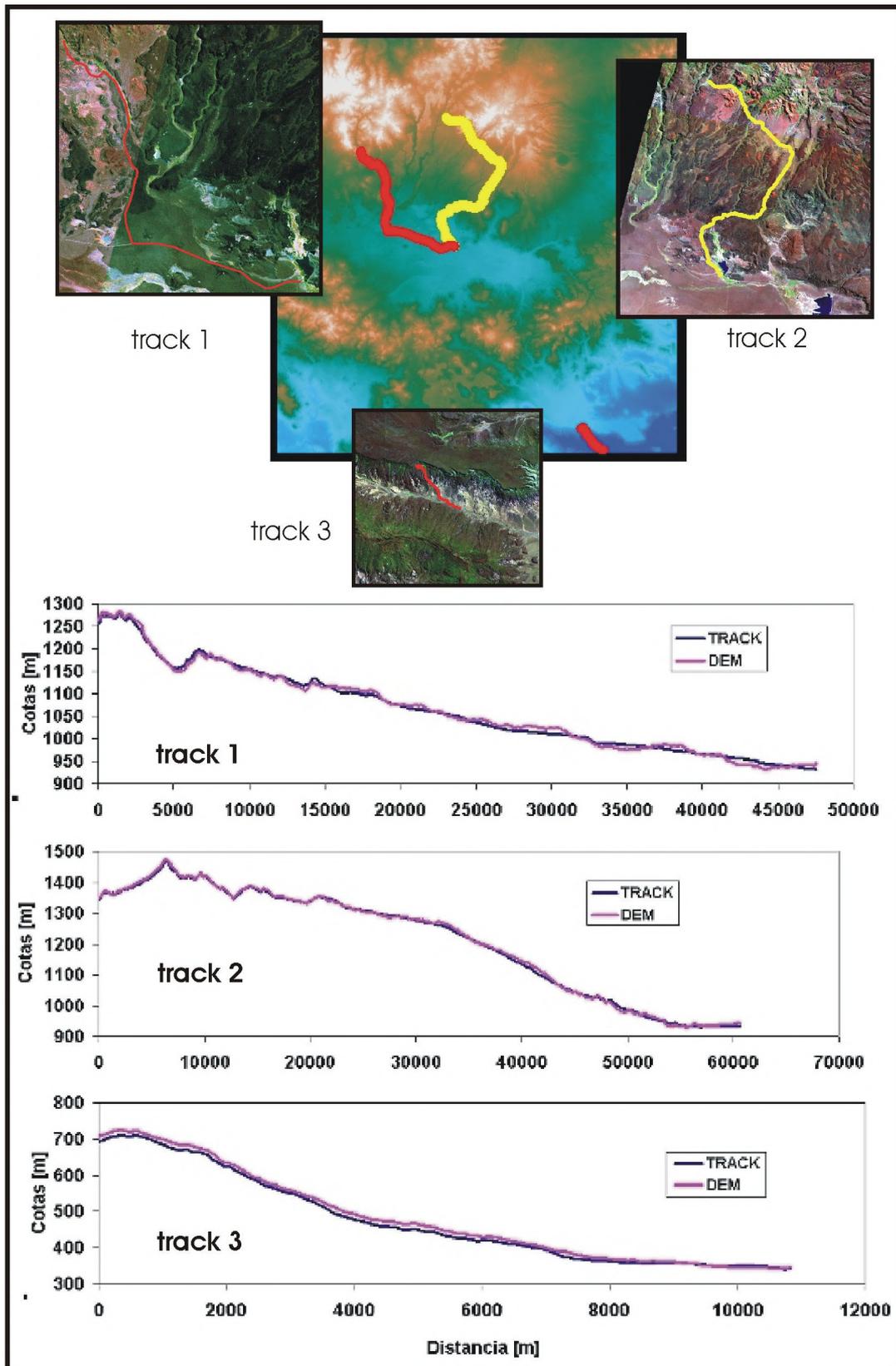


Figura 4.15 Representación sobre el MDE de tres perfiles medidos en campo. Se muestra la superposición de los mismos sobre imágenes Landsat 7 de la zona y los perfiles medidos (color azul) y extraídos del MDE (color rosa)

## **Sumario del ejemplo**

La construcción de un MDE con las características del descrito ha exigido aplicar un procedimiento largo y complicado a las distintas partes del mismo. La aproximación utilizada es la de llevar a cabo el ajuste y la unión de manera conjunta. Para ello se han seleccionado en primer lugar las partes de cada pasada del satélite con mayor cobertura areal y se han aplicado los algoritmos de desplazamiento e inclinación rígidos a los mismos, en base a un conjunto de puntos de control dado. Luego, previo a la constitución de cada pasada, se aplicaron los algoritmos de desplazamiento en  $xy, z$  e inclinación rígidos e Interpolación Lineal Filtrada a los sectores más chicos, para después unirlos mediante un promedio en las zonas de superposición. El paso siguiente fue unir ambas pasadas entre sí, lo cual se logró aplicando previamente el algoritmo de Interpolación Lineal Filtrada a ambas partes, ya con un conjunto de puntos mucho más denso. El último paso fue corregir el MDE completo mediante la Interpolación Lineal Filtrada con todos los puntos de control. Este procedimiento fue el que mejor resultado dio después de un largo trabajo de prueba y análisis de los errores remanentes, durante el cual se utilizaron distintas combinaciones de los algoritmos descritos en el capítulo III.

El algoritmo de inclinación rígida tuvo un efecto notable en la compatibilización de las partes a unir dentro de cada pasada del satélite, mientras que en la unión de ambas pasadas fue necesario recurrir a la Interpolación Lineal Filtrada y a un corte particular de la zona de unión. El análisis con perfiles muestra que la forma del MDE tiene un buen ajuste en general. El análisis con puntos de control muestra que los errores finales se mantienen dentro de límites razonables, quedando una zona de errores grandes en la esquina Noreste, que fue problemática durante todo el procesamiento.

## **MDE Azul**

### **Ubicación geográfica del área**

La cuenca del arroyo Azul se encuentra ubicada en la Provincia de Buenos Aires, entre los  $36^{\circ} 8'$  y  $37^{\circ} 22'$  de latitud y entre los  $58^{\circ} 49'$  y  $60^{\circ} 10'$  de longitud. Su extensión es de unos 150km en sentido Sudoeste – Noreste, y de unos 40km en su parte más ancha, tal como puede observarse en la figura 4.16.

El arroyo del Azul nace en las Sierras del Azul, y discurre hacia el Noreste, recibiendo el aporte de numerosos afluentes, tales como el arroyo Videla, el arroyo Santa Catalina, etc. Finalmente, su curso aporta al río Salado.

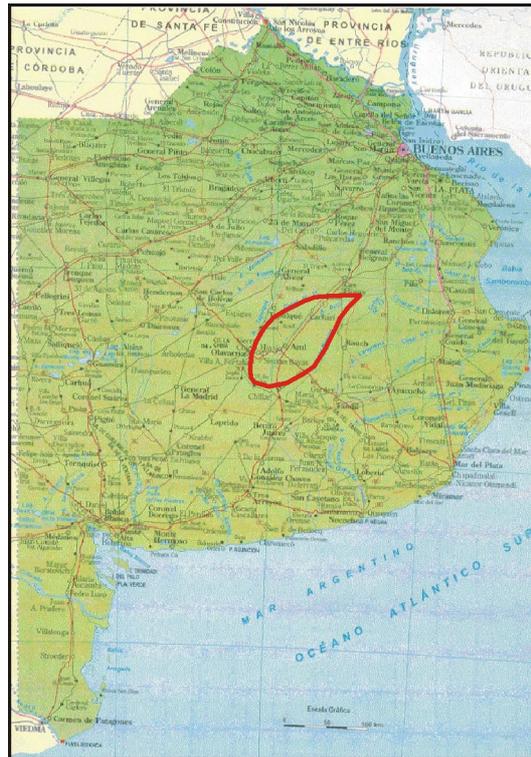


Figura 4.16 Cuenca del Arroyo del Azul. Ubicación sobre el mapa de la Provincia de Buenos Aires<sup>5</sup>.

### Características fisiográficas

Al sur de la cuenca, en las nacientes del arroyo Azul, el relieve es serrano. Dichas serranías se presentan en la actualidad muy erosionadas, pudiéndose ver la roca expuesta en las zonas más altas. Las elevaciones van de unos 90m a unos 350m sobre el nivel del mar. A medida que uno se aleja hacia el norte, el relieve se torna ondulado y finalmente se entra en zona de franca llanura, salpicada de bajos donde se acumula el agua de lluvia.

El clima es muy húmedo y las lluvias se hacen presentes durante todo el año (con media aproximada del orden de 1000mm anuales), siendo los meses de febrero y marzo algo más secos, fundamentalmente por la fuerte evapotranspiración. Este aspecto es importante desde el punto de vista de la reconstrucción interferométrica de la topografía, ya que la coherencia puede verse seriamente afectada por cambios del contenido de humedad del suelo y presencia de agua en superficie.

La región de relieve más elevado es principalmente utilizada como zona de cultivos de trigo, maíz y girasol, con la excepción de las sierras más elevadas, donde el suelo es rocoso. En cambio, la zona de bajos, que comprende casi el 80% de la cuenca, se destina a pasturas, ya que es fácilmente inundable y por lo tanto no apta para cultivos.

El núcleo urbano más importante en la región es la ciudad de Azul y existen además algunos pueblos pequeños, tales como Chillar y Cacharí, interconectados por medio de rutas nacionales, provinciales y caminos vecinales. La campaña está dividida en campos de extensión variable, y casi cada uno de ellos tiene un casco de estancia o casa principal. Asociados a los mismos, existen pequeños bosques de eucaliptus de

<sup>5</sup> Mapa extraído del Atlas del Instituto Geográfico Militar.

considerable altura y/o hileras del mismo árbol demarcando caminos, límite de parcelas, etc.

## **Utilización del MDE**

El MDE de la zona se utiliza como base para estudios de simulación de inundaciones y esto plantea una serie de aspectos a tener en cuenta.

El mecanismo de inundación del área funciona a partir de las precipitaciones. El agua rápidamente escurre hacia los cauces principales y bajos de la región, quedando gran parte de la misma retenida en los últimos. Del total precipitado, sólo el 8% escurre al océano, siendo la mayor parte del agua evacuada por mecanismos de absorción y evapotranspiración, bien conocidos en hidrología de llanuras. Estos fenómenos, combinados con el ascenso de la napa freática, provocan que el agua sea retenida durante largos períodos de tiempo en el sistema de bajos.

La parte llana de la cuenca es la más significativa en cuanto a los mecanismos descriptos. Es importante considerar que pequeños desniveles del orden del metro y menores gobiernan el escurrimiento hacia el sistema de bajos, y por lo tanto el MDE necesita modelar bien esta característica del terreno. También son importantes los terraplenes de rutas y ferrocarriles, que actúan como barreras artificiales para el desplazamiento del agua, constituyéndose en verdaderos diques cuando las alcantarillas no alcanzan a evacuar el agua con la rapidez necesaria.

Dado que este MDE es utilizado para la simulación de inundaciones, es necesario que los grupos de árboles presentes en la región no aparezcan como elevaciones. Los mismos no constituyen una barrera al desplazamiento del agua, es decir que deben ser “ignorados” por el MDE. No ocurre lo mismo con los edificios y otras construcciones de gran porte (tales como silos para almacenar cereal) presentes en la zona. Todo esto lleva a que sea ideal la utilización de un método que naturalmente discrimine entre ambos rasgos, para así evitar un considerable esfuerzo de edición del MDE.

El párrafo anterior plantea una de las principales causas a favor de construir el MDE mediante imágenes de radar, frente a la posibilidad de utilizar técnicas como estereoscopia de imágenes ópticas. Si se elige la longitud de onda adecuada, la vegetación es invisible al radar, mientras que las construcciones constituyen un objeto impenetrable para la radiación electromagnética.

## **Información utilizada**

Para construir el MDE se utiliza información proveniente de fuentes diversas. Para la construcción propiamente dicha se usan imágenes de radar, mientras que en la etapa de corrección y ajuste se utiliza cartografía, puntos y perfiles medidos especialmente para tal fin.

## **Imágenes de radar**

La cuenca del Azul es cubierta por las escenas correspondientes a los *tracks* 4365 y 4347 y el *frame* 167 de los satélites ERS-1/2, tal como puede verse en la figura 4.17.

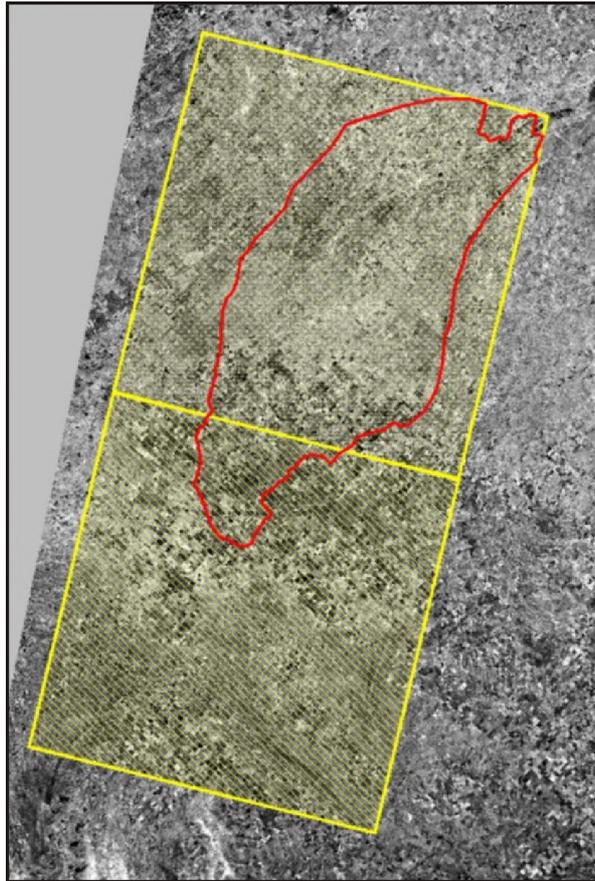


Figura 4.17 Cobertura de los pares interferométricos (amarillo) sobre el Área de Interés (rojo – Cuenca del Azul) desplegado sobre imágenes Landsat 7 pancromáticas de la zona.

Debido a las características climáticas y a la vegetación de la región, que hacen esperar que la coherencia no se mantenga durante mucho tiempo, es recomendable la utilización de pares interferométricos de la misión TANDEM. Esta misión consistió en dos satélites gemelos pasando con un día de diferencia sobre la misma zona, y para ella se utilizaron los satélites ERS-1 y ERS-2 de la Agencia Espacial Europea.

Durante el año 1997 se realizó una misión TANDEM que tomó imágenes de la Argentina. En la tabla 4-III se detallan las características de los pares seleccionados, que fueron provistos por la CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales).

**TABLA 4-III**  
**IMÁGENES SAR UTILIZADAS PARA CONSTRUIR EL MDE AZUL**

PAR SUR			
Satélite	Fecha de Adquisición	Centro	Órbita
ERS-1	17/10/97	-37.5S -60.1W	32720
ERS-2	18/10/97	-37.5S -60.1W	13047
PAR NORTE			
Satélite	Fecha de Adquisición	Centro	Órbita
ERS-1	17/10/97	-36.6S -59.8W	32720
ERS-2	18/10/97	-36.6S -59.8W	13047

Las imágenes fueron procesadas en formato *Single Look Complex* y proyectadas en *slant range*, con un espaciamiento de 7.9m en *range* y 3.98m en *azimuth*.

## MDE IGM

Los puntos utilizados para ajustar el MDE interferométrico son extraídos de un MDE construido a partir de cartografía levantada por el IGM (Instituto Geográfico Militar) en escala 1:50000. El mismo se construyó mediante interpolación entre curvas de nivel y puntos acotados, utilizando la técnica TIN (*Triangular Irregular Network*) y utilizando el SIG ILWIS[50]. La misma se basa en la construcción de una grilla de triángulos que cubre todo el dominio y cuyos vértices están colocados sobre puntos de cota conocida (líneas de nivel y puntos acotados). De esta forma se puede luego interpolar linealmente la altura dentro de cada triángulo.

## Datos de campo

Como validación de campo se dispone de:

1. 11 Puntos Fijos Topográficos (PFT) del IGM y 19 puntos pertenecientes a la Red de Alta Precisión de la Provincia de Buenos Aires (RAPPciaBsAs), distribuidos como en la figura 4.18A y B.
2. 31 puntos correspondientes a la ubicación de pozos de medición del Instituto Hidrológico de Llanuras (IHLLA – UNICEN), figura 4.18C.

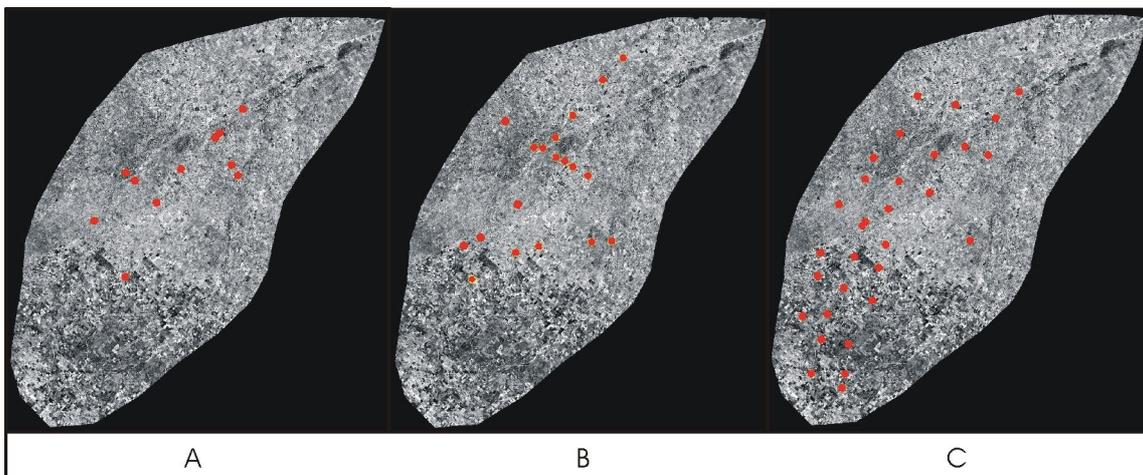


Figura 4.18 A) Puntos Fijos Topográficos, B) Red de Alta Precisión de la Provincia de Buenos Aires, C) Pozos de medición del IHLLA.

## Detalles de la construcción del MDE

Para construir el MDE se utilizó el software comercial EVInsar v.4.1.1, de Atlantis Scientific Inc, que fue provisto por la CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales). Los datos son procesados de manera de generar un producto final con resolución espacial de 20m.

Las etapas llevadas a cabo para la construcción del MDE son las usuales del procesamiento interferométrico, ya detalladas en el análisis del MDE de Gan Gan – Cañadón Asfalto. En esta parte del trabajo sólo se hará referencia a los *settings* especiales y problemas particulares que se hayan planteado para el caso de estudio.

Las etapas de Ingestión de los datos, Corrección y Generación del Interferograma se ejecutaron con los parámetros por defecto del Procesador Interferométrico. El Interferograma fue filtrado y remuestreado de manera de obtener pixels cuadrados y la fase de tierra plana fue restada. La figura 4.19 muestra el interferograma antes y después de la etapa de filtrado, poniendo en evidencia la importancia de este proceso.

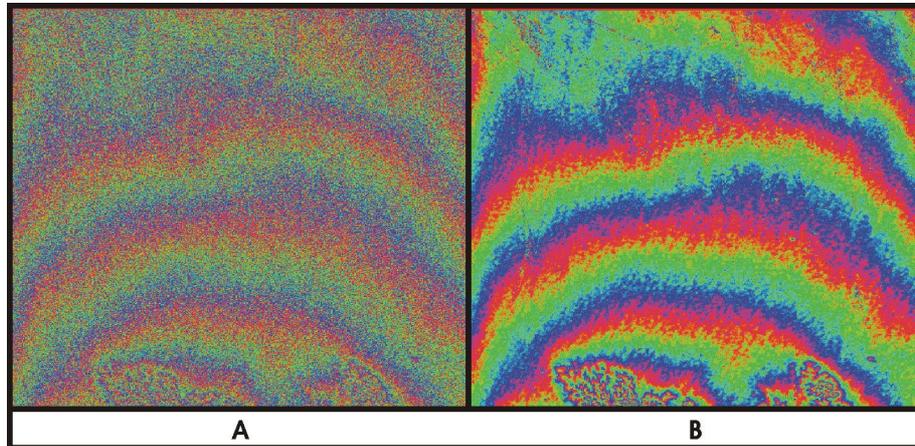


Figura 4.19 Comparación entre el interferograma antes (A) y después (B) de ser filtrado. Puede notarse claramente que la etapa de filtrado es de crucial importancia en la reducción del ruido en fase y por lo tanto de los errores en cota del producto final.

Como puede observarse en la figura 4.20A, el patrón de interferencia se presenta alineado con la dirección de azimuth. Esto es producto de un error en la estimación de la línea de base perpendicular, tal como quedó planteado en el Capítulo II de esta tesis, y tiene su origen en que se utilizaron las órbitas transmitidas por el satélite, las cuales no son suficientemente precisas.

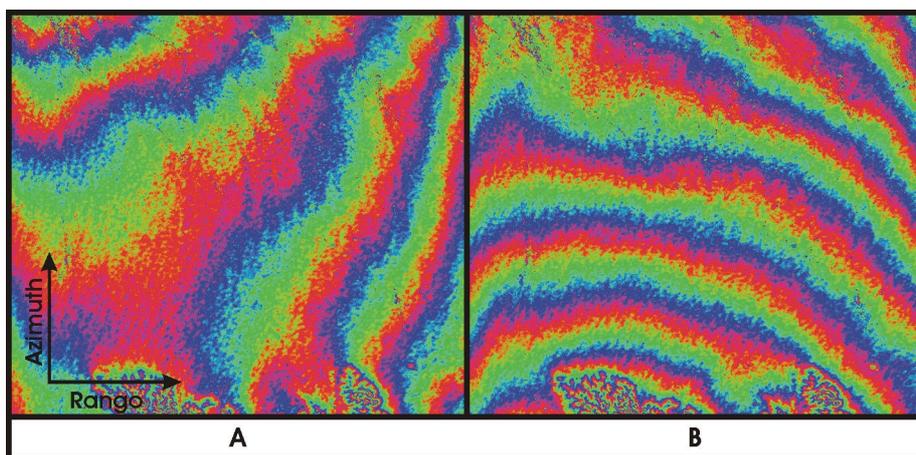


Figura 4.20 A) Interferograma correspondiente a la Cuenca del Azul, afectado por un error en la estimación de la línea de base. B) El mismo interferograma construido con un valor más preciso de línea de base. Puede observarse cómo en el interferograma afectado por error en la línea de base las franjas de fase se curvan alineándose con la dirección de Azimuth. Esto es debido a la rampa en dirección de rango que es introducida por este tipo de error, tal como se detalló en el capítulo II de este trabajo.

Existen dos maneras de subsanar este problema: 1) Utilizar órbitas más precisas que las transmitidas y 2) Refinar la geometría a partir de puntos de control. La solución ideal es la primera, pero desgraciadamente no es posible obtener órbitas precisas del satélite

ERS-1 durante el período en que se tomaron las imágenes utilizadas. Esto es debido a que el satélite salió de servicio en Junio de 1996 y sólo fue encendido durante el año 1997 para algunas misiones, pero sin los servicios de control de posición laser, que es lo que permite alcanzar alta precisión en el cálculo de las órbitas. Por ello, lo que se hizo en este caso fue editar a través del software de interferometría los parámetros de Línea de Base Perpendicular, hasta converger a una solución aproximada (figura 4.20B).

Este trabajo es casi artesanal, y para un caso como el que nos ocupa, sin conocimiento previo de la topografía, cualquier solución es buena a priori. Si dentro de las escenas SAR existe por ejemplo una línea de costa, sabiendo que la cota a lo largo de la misma es constante, se podría editar la línea de base hasta hacer coincidir un *fringe* con la misma. En nuestro caso se utilizó como guía el MDE contruido a partir de topografía IGM. De todos modos, la deformación regional fruto de este problema se soluciona posteriormente en la etapa de corrección y ajuste del MDE.

Los parámetros aproximados a los que se llegó durante el procesamiento interferométrico se muestran en la Tabla 4-IV.

**TABLA 4-IV**  
**PARÁMETROS DE LOS PARES INTERFEROMÉTRICOS DEL MDE AZUL**

<b>Par sur</b>	
Latitud Central	-37.46919° S
Longitud Central	-60.04298° W
Línea de Base Perp.	-253.1m
Línea de Base Paralela	-2.2m
Flat Earth Fringe Rate	0.1907 1/range sample
$\Delta h/\Delta\phi$ at const. lat/long	244.3m
$\Delta h/\Delta\phi$ at const. slant range	38.06m
<b>Par norte</b>	
Latitud Central	-36.58846° S
Longitud Central	-59.73999° W
Línea de Base Perp.	258.1m
Línea de Base Paralela	0.9m
Flat Earth Fringe Rate	0.1938 1/range sample
$\Delta h/\Delta\phi$ at const. lat/long	238.9m
$\Delta h/\Delta\phi$ at const. slant range	37.4m

La etapa de *phase unwrapping* se ejecutó sin mayores inconvenientes, ya que la coherencia es elevada en casi toda el área, o al menos no existen zonas aisladas por líneas de baja coherencia. Tan es así, que no fue necesaria la edición de las conexiones entre residuos con el objeto de mejorar la fase final.

Finalmente, se transformó la fase a cotas y se re proyectó el MDE a la proyección UTM (Universal Transverse Mercator) zona 21 Sur, que es la correspondiente al área. El datum utilizado fue WGS84.

## Corrección y Ajuste

Para realizar la corrección del MDE obtenido se utiliza la técnica propuesta en el capítulo III de esta tesis. Para ello se aprovecha la existencia del MDE construido a partir de topografía IGM. Este último representa bien la topografía a una escala

regional, pero no captura los detalles del relieve que gobiernan el escurrimiento superficial de agua. Podría decirse que el mismo es una versión suavizada de la realidad.

Entonces, el ajuste consiste en los siguientes pasos:

1. Extracción de puntos del MDE IGM.  
Se extrajo una grilla regular de puntos del MDE IGM, que luego fueron utilizados para aplicar el algoritmo de ajuste. La densidad adecuada de puntos se toma de los resultados del experimento sintético presentado en el capítulo anterior de este trabajo. Así, de la figura 3.8 (Capítulo III del presente trabajo) se deduce que no se justifica densificar a más de 1 punto cada 500m ya que esto no genera mejoras sustanciales en el ajuste logrado. Entonces, se utiliza una grilla extraída del MDE IGM con un espaciamiento de 500m en x y 500m en y.
2. Ajuste por mínimos cuadrados y desplazamiento rígido en z. Se aplica a los MDE provenientes del Par Norte y del Par Sur por separado.  
Con los puntos extraídos del MDE IGM se calcula el desplazamiento necesario para situar al MDE interferométrico en la posición z de mínimo error cuadrático.
3. Ajuste mediante un plano inclinado. Se aplica a los MDE provenientes del Par Norte y del Par Sur por separado.  
Con los puntos extraídos del MDE IGM se calcula la ecuación del plano de mínimo error cuadrático. Esta superficie es luego sumada al MDE interferométrico.
4. Unión de las dos partes separadas mediante el algoritmo de deformación puntual (Capítulo III de este trabajo).  
Para ello se extraen una grilla densa de puntos (un punto cada 100m en x y en y) del MDE proveniente del par Norte sobre la zona de superposición con el MDE proveniente del par Sur. Estos puntos se utilizan para corregir el MDE del par Sur mediante el algoritmo de deformación puntual.
5. Aplicación del algoritmo de Interpolación Lineal Filtrada al MDE completo, utilizando la grilla de puntos extraídos del MDE IGM.

## **Análisis de los errores**

La Tabla 4-V muestra los errores remanentes después de cada corrección utilizando los puntos medidos en el terreno y descritos anteriormente (PFT, RAPPciaBsAs y Pozos). Las Figuras 4.21 y 4.22 muestran la distribución de los errores sobre el área de interés.

Inicialmente, el MDE Norte (Figura 4.21A) presenta un desplazamiento hacia cotas menores que las reales (los cálculos de valor de error se hacen como  $e = z_{PC} - z_{MDE}$ ). Este problema es subsanado mediante el desplazamiento rígido en z calculado por mínimos cuadrados, pero aún puede notarse que persiste una inclinación o deformación de características regionales, que hace que la zona norte del MDE quede por debajo de los puntos de control y la zona sur del mismo quede por encima de dichos puntos de control (Fig 4.21B – los puntos blancos indican valores de error negativo). No obstante esto, quedan dos puntos con error negativo en el extremo norte del MDE Norte (Fig 4.21B), lo cual indica que la deformación existente no consiste solamente en una inclinación. Los resultados de la aplicación del algoritmo de inclinación del MDE se

ven en la Figura 4.21C. Esta corrección tiene éxito en eliminar la componente de inclinación y reduce la desviación standard de los errores, pero lógicamente empeora la situación en los puntos ubicados en el extremo norte (Fig 4.21C).

Algo similar a lo descrito en el párrafo anterior acontece con el MDE Sur. Originalmente ubicado en cotas menores que las reales (Fig. 4.21D), luego de aplicar un desplazamiento rígido en z se evidencia una inclinación en sentido Este – Oeste (Fig. 4.21E), probablemente debida a la mala calidad de la línea de base utilizada. La aplicación de la corrección mediante un plano inclinado logra reducir la desviación estándar de 11.59m a 3.67m.

**TABLA 4-V**  
**EVOLUCIÓN DE LOS ERRORES DEL MDE AZUL**

<b>PAR NORTE</b>					
	Original	Desp. xy	Mín. Cuadrados	Plano Inclinado	Interp. Lineal Filtrada (ILF)
Media	38.3	--	-1.5	-0.9	--
Desv. Estándar	5.54	--	5.54	4.23	--
Máx (-)	30.7	--	-9.2	-14.0	--
Máx (+)	50.7	--	10.8	8.9	--

<b>PAR SUR</b>					
	Original	Desp. xy	Mín. Cuadrados	Plano Inclinado	Interp. Lineal Filtrada (ILF)
Media	19.6	--	-4.4	2.2	--
Desv. Estándar	11.59	--	11.59	3.67	--
Máx (-)	7.5	--	-16.6	-1.3	--
Máx (+)	33.1	--	9.0	9.4	--

<b>MDE AZUL COMPLETO</b>		
	Original	Interp. Lineal Filtrada (ILF)
Media	-0.5	-0.6
Desv. Estándar	4.27	3.22
Máx (-)	-14.0	-10.9
Máx (+)	9.4	10.5

Es notable que en el MDE Norte aparece una inclinación en sentido Norte – Sur, mientras que en el MDE Sur la inclinación tiene sentido Este – Oeste. Esta diferencia proviene de diferencias en el procesamiento interferométrico de ambos pares. En el caso del MDE Norte, en el que la zona de interés abarca gran parte de la cobertura radar (Fig 4.21), fue posible ajustar mediante prueba y error los valores de línea de base perpendicular, hasta hacer que los *fringes* coincidan bastante aproximadamente con las curvas de nivel del MDE IGM. Como la inclinación regional de la zona de interés tiene una dirección preferencial hacia el Norte, es sencillo remover las tendencias erróneas en sentido Este – Oeste, y permanece una pequeña inclinación de orientación Norte – Sur. Nótese que la desviación estándar del error para la corrección por mínimos cuadrados en el Par Norte es relativamente baja (5.5m). El MDE Sur es cubierto sólo por una pequeña porción del par interferométrico correspondiente, y corresponde a un área de sierras bajas que no tiene una inclinación regional claramente definida. Esto hace mucho más dificultoso el refinamiento de la línea de base, por lo que en este caso dicho proceso no se realizó, dejando sin modificar la geometría calculada a partir de datos orbitales. La inclinación que aparece en el producto final probablemente provenga entonces de imprecisión en los datos orbitales (este es un problema bien conocido en interferometría) ya que la orientación de la misma es coincidente con la dirección perpendicular a la dirección de vuelo del satélite. El hecho de haber trabajado durante el procesamiento interferométrico para reducir errores en el caso del MDE Norte y no

haberlo hecho en el caso del MDE Sur explica también la mayor desviación estándar que presenta este último (11.59m contra 5.5m).

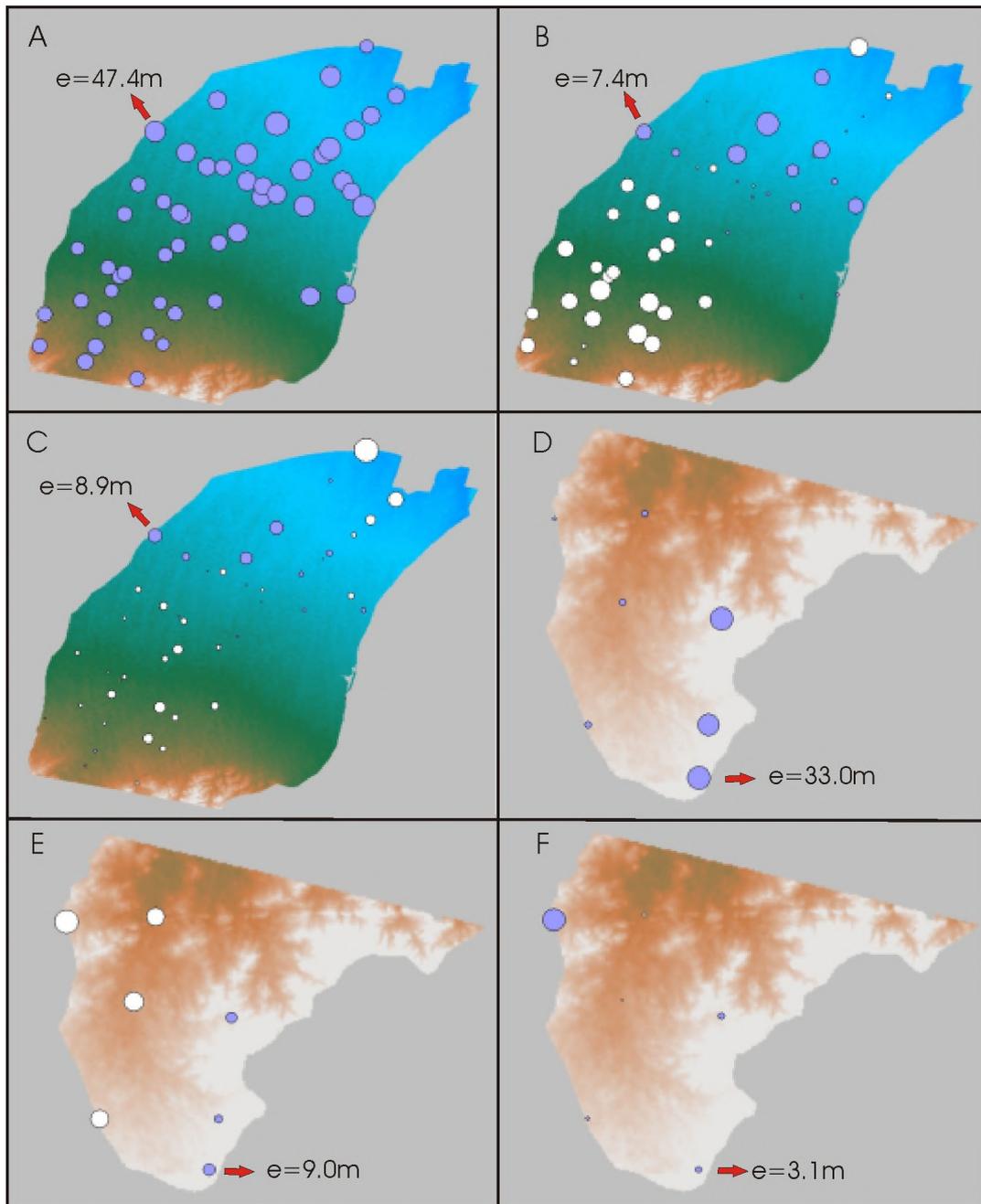


Figura 4.21 Evolución de los errores sobre zonas del MDE Azul. Los puntos azules representan valores positivos, los puntos blancos representan valores negativos y se ha indicado en cada caso un valor para dar idea de la magnitud. A,B,C) MDE Norte original y después de haber sido corregido con Mínimos Cuadrados e Inclinación respectivamente. D,E,F) Idem para el MDE Sur.

Es importante notar que, pese a haber corregido la línea de base en un caso y no en el otro, el resultado final no muestra tendencias claramente asociables a esta diferencia de procesamiento. Esto es auspicioso, e indica que el procedimiento aplicado permite evitar este trabajo, que suele ser tedioso y de éxito dudoso.

El paso de unión de ambas partes (MDE Norte con MDE Sur) sólo afecta localmente a la zona de superposición, con lo cual no hay modificaciones importantes en zonas alejadas de la misma. Esto queda evidenciado en los valores de la Tabla 4-V (MDE Azul original), donde los máximos positivo y negativo son los correspondientes al máximo de las partes separadas, la media es una combinación de ambas medias y la desviación estándar es muy cercana a la mayor de ambas.

Finalmente, como puede verse en la figura 4.22A persiste una tendencia regional del error, que presenta una faja de orientación Noroeste – Sudeste de valores de error negativo, rodeada por fajas de error positivo. Al conjunto se le aplica la Interpolación Lineal Filtrada (ILF), que permite reducir los errores de tendencia regional, tal como puede verse en la figura 4.22B, que presenta una mejor distribución de residuos positivos y negativos. Los valores extremos en este último caso se ubican sobre los bordes del MDE y en particular el máximo negativo está en una zona de muy baja coherencia en las imágenes originales.

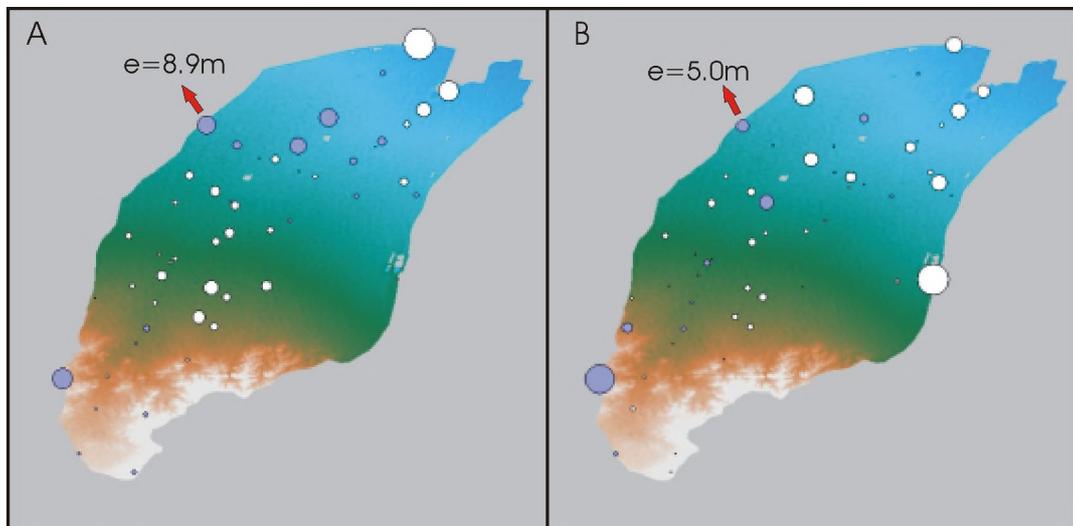


Figura 4.22 Distribución de los errores sobre el MDE Azul completo. A) Errores antes de aplicar la Interpolación Lineal Filtrada, B) errores posteriores a la aplicación de la Interpolación Lineal Filtrada.

### Sumario del ejemplo

La modelación de la cuenca del Azul plantea problemas diversos a los encontrados en el caso de Gan Gan – Cañadón Asfalto. La primer gran diferencia entre ambos es que en este caso (Azul), debido a que el relieve es muy suave, no se dan casos de decorrelación por altas pendientes, problema en el caso anterior hizo necesario un considerable esfuerzo en la etapa de desenrollado de fase. En el MDE Azul, la fuente de decorrelación principal proviene de las zonas anegadas, importantes especialmente en la parte este de la zona de interés. Las características de la zona podrían haber hecho este problema mucho más grave, pero esta situación se evitó seleccionando un par de imágenes con muy poco tiempo entre adquisiciones.

La otra gran diferencia en el tratamiento adoptado se basa en la disponibilidad de puntos de corrección. En el caso Gan Gan – Cañadón Asfalto se dispuso de una gran cantidad de esta información, cosa que no ocurrió en el caso de Azul. Por esta razón, fue necesario recurrir a información topográfica extraída de otra fuente, como es el MDE interpolado a partir de relevamientos del IGM.

En base a esta situación, la metodología adoptada se basa en la aplicación de los algoritmos de desplazamiento rígido e Interpolación Lineal Filtrada sobre ambas partes del MDE (MDE Norte y MDE Sur), con una grilla relativamente densa extraída del MDE IGM. Luego se realiza la unión de los mismos adaptando el MDE Sur al MDE Norte mediante el algoritmo de Deformación Puntual con una grilla de puntos muy densa extraída del MDE Norte. Finalmente, se aplica la Interpolación Lineal Filtrada a todo el MDE para corregir los efectos de borde que puedan haber quedado cercanos a la zona de unión.

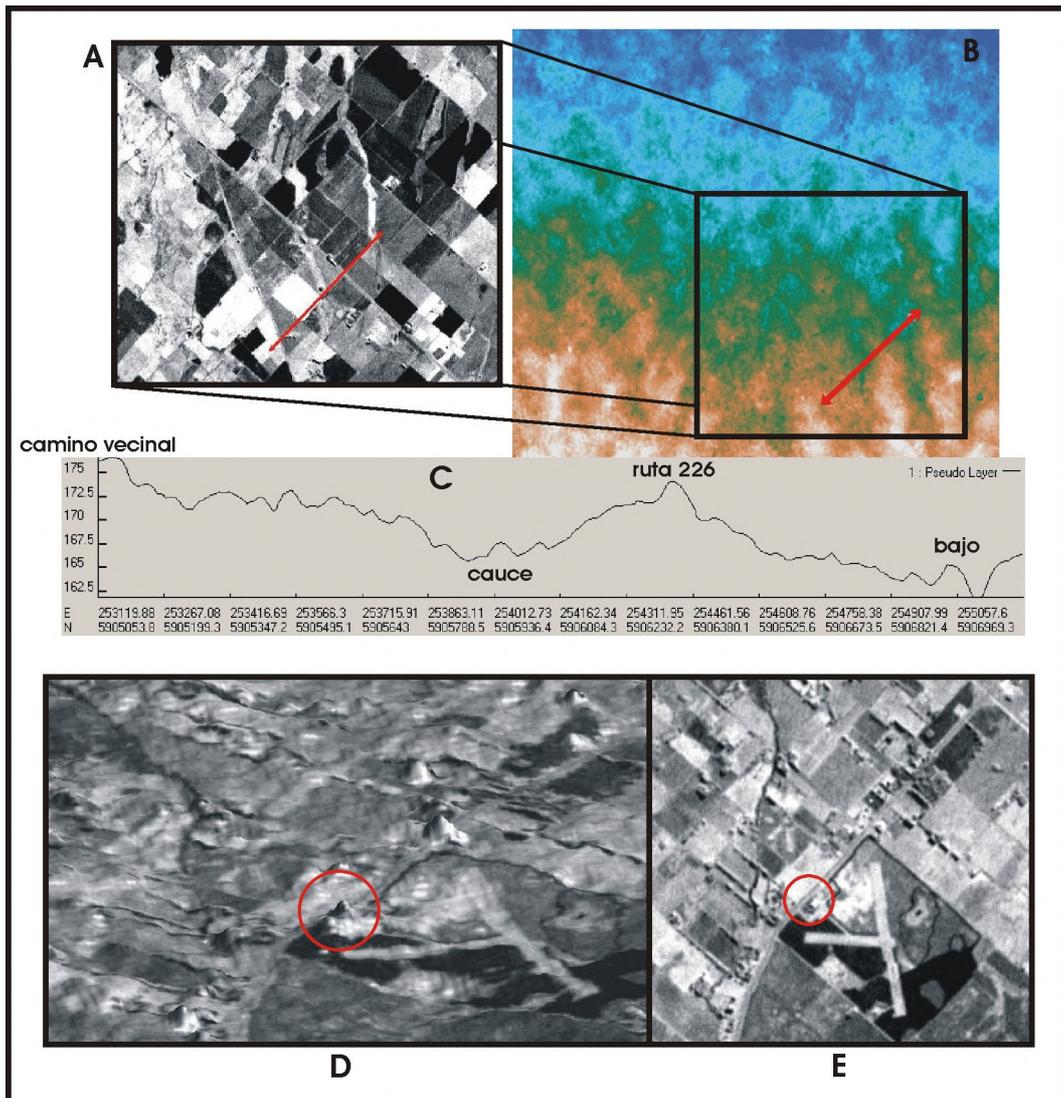


Figura 4.23 A,B,C) Perfil extraído de una zona del MDE Azul; se muestra su traza sobre una imagen Landsat, sobre el MDE y el perfil en sí, respectivamente. D,E) Vista tridimensional y en planta de la zona de la aeródromo de Azul.

El resultado de este procedimiento es una drástica disminución de los errores y del ruido asociado dentro del MDE interferométrico, pero conservando la rugosidad del terreno, que es la característica que lo hace útil para la finalidad de simulación de inundaciones. Con respecto a las características de este MDE, es útil observar algunos detalles como los que se muestran en la figura 4.23. En la misma puede verse un perfil extraído del MDE sobre una imagen Landsat pancromática (4.23A), sobre el MDE (4.23B) y el perfil en sí (4.23C). Éste último cruza un camino vecinal y una ruta, así como también

un par de cauces, tal como claramente puede verse sobre la imagen Landsat. Si se observa con detenimiento el MDE (4.23B) puede advertirse la traza de la ruta y del camino vecinal sobre el mismo. Esto es sumamente importante, ya que demuestra cómo la técnica utilizada logra capturar estos rasgos, fundamentales en la simulación de inundaciones, y cómo pese a todas las etapas de corrección y filtrado los mismos no desaparecen. En la figura 4.23D y E puede verse otro ejemplo en el mismo sentido. La primera de ellas muestra en 3 dimensiones la zona del aeródromo de Azul, y la segunda la misma zona en planta. Se nota claramente cómo el MDE captura cosas como las construcciones más importantes de la zona, y deja pasar las arboledas (en color oscuro alrededor de la pista del aeródromo).

## **Conclusión**

Con el detalle de las dos aplicaciones descritas se da por concluido el presente capítulo. Es necesario destacar que los resultados han sido satisfactorios desde el punto de vista de la utilización de los MDE construidos, tal como se verá someramente en el capítulo siguiente. También es de importancia el hecho de que las técnicas de corrección desarrolladas no solamente han sido utilizadas en los casos expuestos, sino que han servido para generar otros productos de calidad similar en distintas áreas de la Argentina.

En el capítulo siguiente se resumen las conclusiones del trabajo realizado y se describen algunas de las aplicaciones a que han estado destinados los MDE construidos aquí. También se plantea la dirección que ha seguido el trabajo y se dejan sentadas las bases del desarrollo necesario a partir de aquí para mejorar lo hecho hasta ahora.

# 5

## CONCLUSIONES

Se ha propuesto una metodología que permite corregir Modelos Digitales de Elevación mediante conjuntos de puntos de cota precisa dispersos sobre el área de interés. Este trabajo surge como respuesta a una creciente necesidad de disponer de información topográfica confiable y de alta resolución por parte de la comunidad científica y técnica, empresas y gobierno. Simulación de fenómenos naturales que afectan a la población y ponen en riesgo a la misma (inundaciones), construcción de herramientas para el alerta temprano y la evacuación, estudios de factibilidad y diseño de planes de explotación de recursos naturales, trazado de caminos y cañerías; todos estos estudios necesitan como base sólida un Modelo Digital de Elevación de buena calidad.

La tecnología actual, con nuevos instrumentos y novedosas técnicas, ha puesto los MDEs al alcance de cualquier institución que los necesite, facilitando la construcción, disminuyendo los costos asociados a la misma y permitiendo obtener productos con resolución espacial cada vez mayor. Sin embargo, las técnicas más efectivas, basadas en información de origen satelital, presentan la seria desventaja de que las cotas obtenidas están afectadas por errores importantes introducidos por la geometría de observación, la atmósfera, las características del terreno, etc. Si esto no es tenido en cuenta durante la construcción del MDE, la calidad, y por lo tanto la utilidad del producto obtenido al final de proceso se degrada rápidamente.

Este trabajo apunta principalmente a la corrección de MDEs construidos mediante interferometría de imágenes de radar, aunque las metodologías desarrolladas son perfectamente aplicables a otro tipo de modelos. Se plantean estrategias de corrección basadas en cinco algoritmos distintos, de diversa complejidad, y cada uno tendiente a resolver determinados aspectos del problema. Una de las grandes ventajas de esta visión es que los algoritmos de corrección pueden ser combinados de distinta manera, teniendo en cuenta los errores originales del MDE, la disponibilidad de puntos de control y el nivel de corrección que se desea alcanzar.

Los algoritmos 1, 2 y 3 consisten en la aplicación de movimientos rígidos al MDE, es decir, se trata de ubicarlo en la posición de menor error sin deformar la superficie. Así, desplazamientos horizontales ( $xy$ ), verticales ( $z$ ), e inclinación, todos calculados en base a la nube de puntos de corrección son aplicados basados en criterios de mínimos cuadrados. La corrección por medio de estos algoritmos se demuestra rápidamente insuficiente en casos reales, ya que persisten deformaciones de carácter regional o local en los MDEs construidos mediante interferometría de imágenes de radar.

El cuarto algoritmo propuesto constituye el resultado original más importante de este trabajo. El mismo responde a la necesidad de deformar el MDE para tener en cuenta errores de alcance regional. La deformación se calcula construyendo una triangulación Delaunay que tiene como nodos a los puntos de corrección para calcular la superficie de deformación necesaria. Sin embargo, los errores que se tratan de corregir tienen componente regional y componente local en cada punto y la experiencia realizada sólo con la triangulación pone de manifiesto la necesidad de suavizar esta superficie de deformación para no introducir componentes locales en zonas alejadas de cada punto. Esto lleva a la utilización de un filtro especial, que se aplica a la triangulación para suavizarla y dejar solamente la componente regional.

El uso de la combinación triangulación-filtro es denominada Interpolación Lineal Filtrada, y ha demostrado ser de gran utilidad en numerosos casos de aplicación real, dos de los cuales son detalladamente descriptos en este trabajo.

El quinto algoritmo, denominado Deformación Puntual, es complementario de la Interpolación Lineal Filtrada. El mismo consiste en llevar cada punto conocido a su cota ideal y en el espacio intermedio utilizar una función gradiente que decae rápidamente en función de la distancia al punto. Esto permite aplicar deformaciones locales sin introducir discontinuidades en la topografía y su diseño surgió de la observación en un caso real (no presentado en este trabajo) en los que la altura de montañas muy escarpadas es subestimada por el método de construcción del MDE.

La aplicación combinada de estos algoritmos ha permitido resolver situaciones de distinta naturaleza y construir MDEs que han satisfecho necesidades concretas de la comunidad. En esta tesis se han presentado dos de los trabajos realizados, seleccionados por su complejidad y por presentar características particulares que han hecho necesario utilizar distintas combinaciones de los algoritmos descriptos.

El primero de ellos es el MDE de la zona centro-norte de la provincia del Chubut: un área montañosa cubierta por cuatro pares interferométricos distintos con gran superposición entre sí. Se dispone además de un gran conjunto de puntos de corrección (del orden de 1800 puntos) muy bien distribuidos, lo cual permite hacer un buen estudio de validación del resultado obtenido. El problema más grave que presenta este caso es la

unión de las dos pasadas contiguas, problema que se resolvió exitosamente mediante el algoritmo de Interpolación Lineal Filtrada. Como resultado se obtuvo un MDE completo con desviación estándar del error menor a 10m, que era lo requerido.

El caso del MDE de la cuenca del arroyo del Azul, ubicada en un zona de llanura presenta problemas de diferente naturaleza. Por una parte, es necesaria una precisión mayor debido a la utilización futura del MDE en simulación de inundaciones. Por otra parte no se dispone de un muy buen conjunto de puntos de control, pero si de un MDE (IGM) de menor resolución, bueno a nivel regional pero que no representa la “textura” típica de terreno. La solución adoptada en este caso consiste en extraer una densa grilla de puntos del MDE IGM y utilizar éstos para corregir el MDE interferométrico. De esta forma se aprovechan las mejores cualidades de cada modelo: el interferométrico capturando la textura del terreno y el de IGM su precisión en cotas en términos absolutos. Adicionalmente, este caso presenta también la necesidad de una unión, que se resolvió apelando al algoritmo de deformación puntual, tal como ha sido detallado en el capítulo correspondiente.

En base a lo expuesto se puede concluir que la serie de algoritmos propuestos, y especialmente el de Interpolación Lineal Filtrada, son de suma utilidad para resolver el problema de mejorar MDEs aprovechando al máximo la información disponible. Es de destacar que normalmente la información puntual existe con anterioridad, o de cualquier manera es medida para otro tipo de estudios. Con esto se quiere decir que muchas veces no es necesario medir puntos especialmente para corregir el MDE, y el problema pasa a ser uno de integración de información existente.

Por otra parte, la forma de encarar la solución del problema tiene la flexibilidad suficiente que ha permitido resolver casos muy diferentes, tales los MDEs de Azul y de Chubut.

## **Utilización de los MDEs ejemplo presentados en el capítulo IV**

Los MDEs construidos y corregidos mediante la técnica descrita, lejos de ser solamente un ejercicio académico, son utilizados actualmente por varias instituciones con fines concretos.

El área cubierta por el MDE Chubut es importante desde el punto de vista de la prospección petrolera. Es además un área alejada de poblados importantes y cuenta con una red caminera muy rala. Actualmente, estudios de gravimetría y geología de superficie son llevados a cabo en la misma, y el MDE constituye una herramienta fundamental para el diseño de las campañas de medición. Es deseable que en el futuro el mismo desempeñe un rol importante para decidir trazados de caminos, ductos, e instalaciones en caso de que el área entre en fase de explotación.

El MDE de la cuenca del arroyo del Azul es utilizado como base para estudios de escurrimiento superficial de agua de lluvia. El objetivo final de estos estudios es poner a punto un modelo de simulación de inundaciones que permita comprender mejor la dinámica de las mismas en una zona de gran importancia económica. Algunos de los resultados obtenidos hasta el momento pueden verse en las figuras 5.1 y 5.2. La primera

de ellas muestra un instante de la simulación de inundaciones realizada con el modelo ACQUA[52]. Pueden observarse los arroyos que se activan luego de una lluvia y el sistema de bajos donde el agua de queda retenida. En la figura 5.2 se compara la simulación del escurrimiento sobre el MDE interferométrico corregido (A), el MDE IGM (B) y una carta típica de inundación (C). Puede notarse como el MDE interferométrico representa el sistema de bajos de una forma mucho más realista que el MDE construido a partir de cartas topográficas. Para finalizar, la figura 5.3 muestra la respuesta del modelo frente a un evento de lluvias complejo (dos picos separados en el tiempo) en la subcuenca Santa Catalina. Puede observarse cómo la simulación (línea continua roja) logra representar muy bien los dos picos de caudal que se producen (los puntos negros son las mediciones de campo) como respuesta a los picos de lluvia (barras azules).

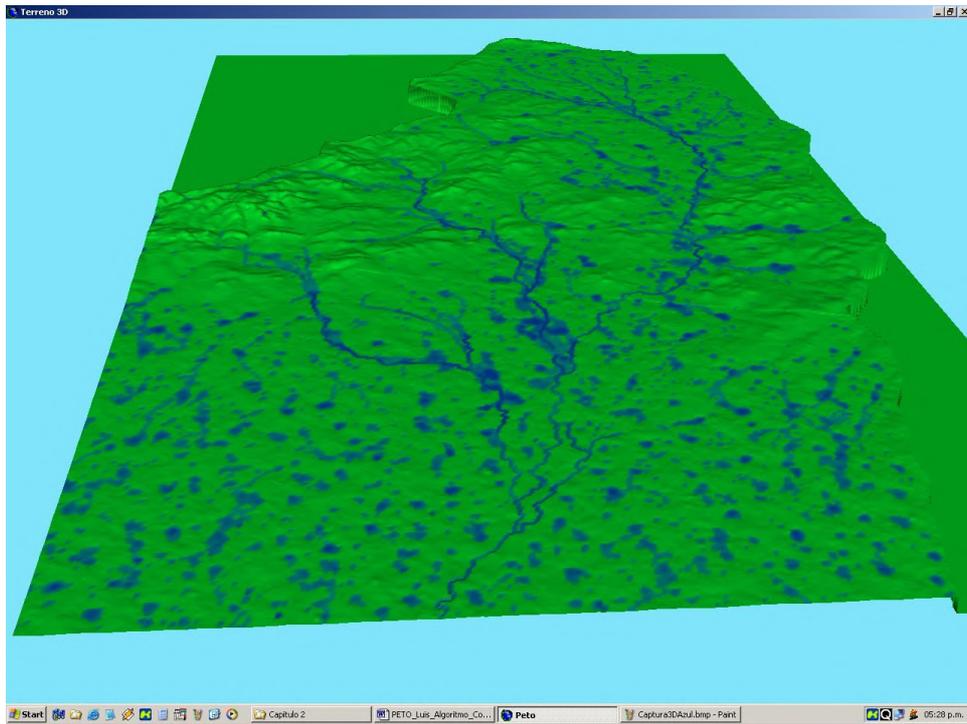


Figura 5.1 Un instante de la simulación de inundación realizada con el modelo ACQUA sobre el MDE Azul. Nótese cómo está representado el sistema de bajos característicos de esta zona.

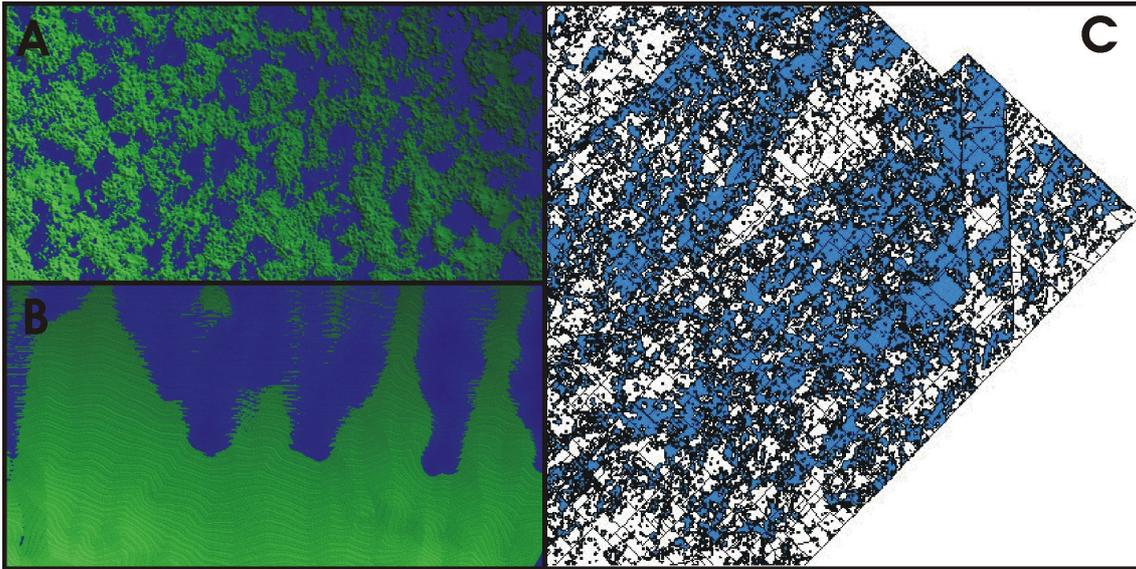


Figura 5.2 Comparación entre la simulación del escurrimiento sobre el MDE interferométrico corregido (A), el MDE IGM (B) y una carta típica de inundación (C). Puede notarse como el MDE interferométrico representa el sistema de bajos de una forma mucho más realista que el MDE construido a partir de cartas topográficas.

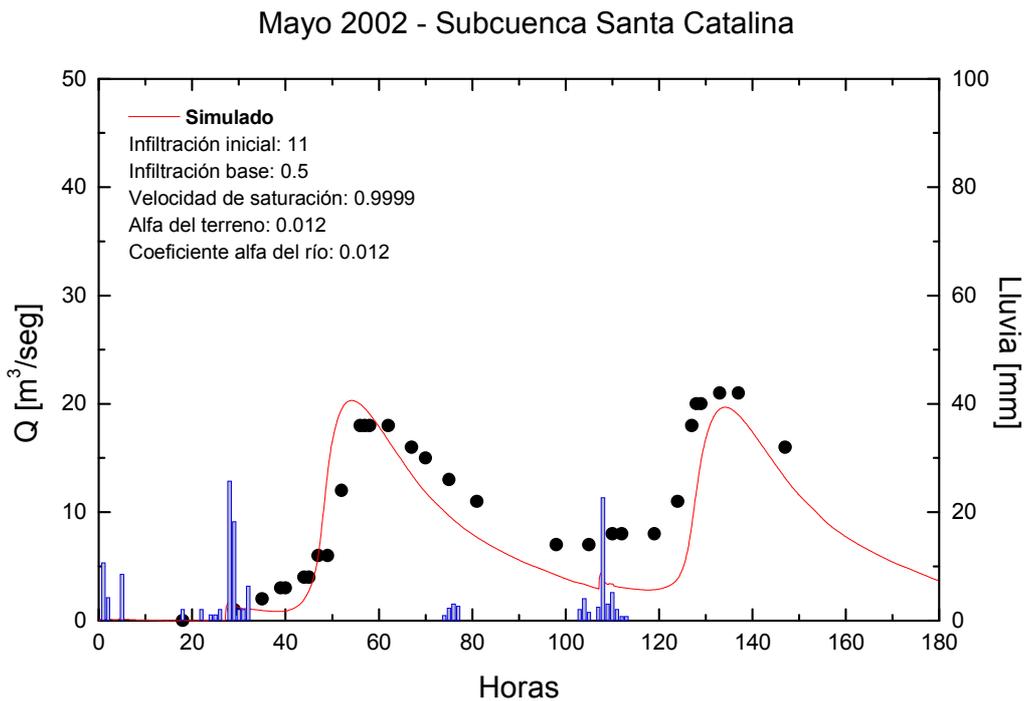


Figura 5.3 Resultados de la simulación en un punto de la subcuenca Santa Catalina. Se comparan las mediciones de campo (puntos negros) con la simulación con el modelo ACQUA realizada sobre el MDE Azul (línea roja) para eventos de lluvia complejos (barras azules).

## **Software generado**

Los algoritmos descriptos en la presente tesis han sido implementados en lenguaje de programación C++, en un software que se ha denominado DemToolbox, y que cuenta con las siguiente funcionalidades:

1. Aplicación de los algoritmos de corrección descritos.
2. Lectura y escritura de listas de puntos de corrección.
3. Cálculo de los errores y generación de estadísticas.
4. Extracción de listas de puntos de un MDE externo.
5. Extracción de perfiles.

Los programas pueden ser utilizados desde una aplicación visual tipo windows, o pueden ser lanzados independientemente.

## **Recomendaciones y trabajo a futuro**

Puede observarse en los MDEs presentados en este trabajo que, luego de las etapas de corrección, permanecen zonas con error relativamente elevado. Esto es así en los bordes del MDE de la cuenca del arroyo del Azul y en la zona Noreste y Sur del MDE de la zona ubicada en la provincia del Chubut. Estas zonas coinciden con áreas de baja coherencia en el procesamiento interferométrico, es decir que son zonas en donde la información de cota obtenida es muy ruidosa. Si un punto de corrección cae en una de estas zonas, la corrección aplicada con la ILF puede propagar componentes de error locales a puntos vecinos. Esto quiere decir que la corrección introduce un error adicional en otras zonas del MDE.

Una posible manera de tener en cuenta este efecto es introduciendo una modificación de los factores de peso que utiliza el filtro. Se podría calcular el factor de peso en base a la coherencia de los píxeles correspondientes a cada punto y de esta manera limitar la movilidad de los que caen en zonas de mayor coherencia y dejar más libres a los que caen en zonas de baja coherencia. De esa manera estos últimos se ‘acomodarían’ sin afectar a sus vecinos más confiables.

Otra posibilidad que se debe explorar es la de modificar la estructura de vecinos utilizada por la triangulación, de manera tal que aquellos puntos calificados como de menor calidad no influyan sobre sus vecinos de mejor calidad. Un criterio posible es el de hacer que la corrección de cada punto sea calculada solamente en base a los que tienen mejor calidad que él mismo.

Es interesante también encontrar la manera de combinar conjuntos de puntos de corrección de diverso origen, es decir, con distinto nivel de precisión, confiabilidad, etc. Un caso que puede ser útil es el de combinar puntos medidos en el campo con puntos extraídos de un MDE de menor resolución.

Para finalizar, existen en desarrollo técnicas basadas en interferometría de imágenes de radar que permiten mejorar la precisión de la estimación de cota. Concretamente se habla de SBAS y Permanent Scatterers. Básicamente, se utilizan grandes series de imágenes que abarcan largos períodos de tiempo; mientras mayor es el número de imágenes mejor es la estimación de cota. Una debilidad de estas técnicas radica en que

sólo es posible extraer una medición en puntos que conserven un aceptable nivel de coherencia en todas las imágenes. Normalmente, debido a decorrelación temporal la conservación de la coherencia se mantiene solo en puntos distribuidos en el área de interés, puntos en los cuales es posible calcular la cota muy precisamente. Bien, estos puntos podrían ser utilizados dentro del esquema propuesto en esta tesis para interpolar las zonas del MDE donde no se puede calcular la cota con precisión

# 6

## REFERENCIAS

- [1] A. M. Felicísimo, Curso de Modelos Digitales del terreno, <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/CursoMDT/CursoMDT.html>, 2004
- [2] N. Cressie, Statistics for Spatial Data, Revised Edition, p. 105, Ed. Wiley-Interscience, New York, 1993
- [3] G. Strang y K. Borre, Linear Álgebra, Geodesy, and GPS, Part II – Part III, Ed. Wellesley-Cambridge Press, Wellesley, 1997
- [4] A. Leick, GPS Satellite Surveying, E. Wiley-Interscience, New York, 1995
- [5] M. Bar-Lev, L. Shcherbina y V. Levin, “EROS System – Satellite Orbit and constellation design”, <http://www.imagesatintl.com/customer-support/techarticles>
- [6] Página web de Space Imaging, <http://www.spaceimaging.com>
- [7] H. Land y R. Welch, Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER Digital Elevation Models (Standard Product AST14), Version 3.0, <http://eosps.gsfc.nasa.gov>, 1999.
- [8] ERDAS Inc., IMAGINE OrthoBASE Tour Guide, Capítulo 2, Ed. ERDAS, 2001
- [9] P. Wolf, Elements of Photogrammetry, 2da Edición, McGraw-Hill International Editions, 1983
- [10] Página web de Spot Image, <http://www.spotimage.fr>
- [11] M. Abrams y S. Hook, ASTER Users Handbook, Jet Propulsion Lab, Pasadena CA, <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>
- [12] Th. Toutin, “Opposite Side ERS-1 SAR Stereo Mapping over Rolling Topography”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 34, N°2, pp. 543-549, March 1996
- [13] F. Ulaby, R. Moore y A. Fung, Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. 2: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission, Ed. Addison Wesley, Reading MA, 1982
- [14] T. Lillesand y R. Kiefer, Remote Sensing and Image Interpretation, 3ra edición, Ed. John Wiley & Sons, Nueva York, 1994

- [15] J. Curlander y R. McDonough, Synthetic Aperture Radar. Systems and Signal Processing, Cap. 1, Ed. John Wiley, New York, 1991.
- [16] European Space Agency, ASAR – Envisat’s Advanced Synthetic Aperture Radar, ESA bulletin 102, mayo 2000
- [17] Comunicación personal con Alberto Giraldez, Investigador Principal de la misión SAOCOM.
- [18] C. Olmsted, Alaska SAR Facility Scientific SAR User's Guide, ASF-SD-003, 1993.
- [19] D. Ghiglia y M. Pritt, Two-Dimensional Phase Unwrapping. Theory, Algorithms, and Software, John Wiley & Sons., New York, 1998.
- [20] E. Gettys, F. Keller y M. Skove, Física Clásica y Moderna, McGraw Hill, Madrid, 1991.
- [21] H. Zebker y R. Goldstein, “Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations”, Journal of Geophysical Research, Vol. 91, N° B5, pp. 4993 – 4999, April 10, 1986
- [22] Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Web Page, <http://www.jpl.nasa.gov/srtm/>, 2003
- [23] S. Madsen, H. Zebker y J. Martin, “Topographic Mapping Using Radar Interferometry: Processing Techniques”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, N° 1, January 1993
- [24] M. Bao, C. Brünig y W. Alpers, “Simulation of Ocean Waves Imaging by an along-Track Interferometric Synthetic Aperture Radar”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 35, N° 3, pp. 618-631, May 1997
- [25] D. R. Lyzenga y J. R. Bennet, “Estimation of Ocean Wave Spectra Using Two-Antenna SAR Systems”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 29, No. 3, pp. 463-465, may 1991
- [26] L. Gray y P. Farris-Manning, “Repeat-Pass Interferometry with Airborne Synthetic Aperture Radar”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, N° 1, January 1993.
- [27] C. Prati y F. Roca, “3-D synthetic aperture radar surveys”, Stanford Exploration Project, SEP-57, pp. 463 – 477, 1988
- [28] H. Zebker y J. Villaseñor, “Decorrelation in Interferometric Radar Echoes”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30, N°5, September 1992
- [29] H. Zebker, C. Werner, P. Rosen y S. Hensley, “Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, N°4, pp. 823 – 836, July 1994.
- [30] F. Li y M. Goldstein, “Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, N°1, January 1990
- [31] F. Gatelli, A. Monti Guarnieri, F. Parizzi, P. Pasquali, C. Prati y F. Rocca, “The Wavenumber Shift in SAR Interferometry”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, N° 4, pp. 855-865, July 1994
- [32] F. Ulaby, R. Moore y A. Fung, Microwave Remote Sensing Vol II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory, Cap. 11, Ed. Artech House, Norwood MA, 1986
- [33] P. Rosen, S. Hensley, H. Zebker, F. Webb y E. Fielding, “Surface Deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry”, Journal of Geophysical Research, 101(E10), 23, 109 – 23, 125, 1996

- [34] D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl y T. Rabaute, “The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry”, *Nature*, Vol. 138, pp. 138-142, July 1993
- [35] G. Franceschetti y R. Lanari, *Synthetic Aperture Radar Processing*, Cap. 1, Ed. CRC Press LLC, Boca Raton (Florida), 1999
- [36] R. Hanssen, *Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry*, Ed. Delft University Press, Delft, 1998
- [37] M. Bevis, S. Businger, T. Herring, C. Rocken, R. Anthes y R. Ware, “GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, N° D14, pp. 15787 – 15801, October 20, 1992
- [38] H. Zebker, P. Rosen y S. Hensley, “Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps”, *Journal of Geophysical Research*, Vol 102, N°B4, pp. 7547-7563, april 1997
- [39] S. Williams, Y. Bock y P. Fang, “Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products”, 103(B11), pp. 27051-27068, 10.1029/98JB02794, 1998
- [40] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari y E. Sansosti, “A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, N° 11, pp. 2375 – 2283, November 2002
- [41] D. Sandwell y E. Price, “Phase gradient approach to stacking interferograms”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, N° B12, pp. 30183-30204, December 1998
- [42] A. Ferretti, C. Prati y F. Rocca, “Permanent Scatterers in SAR Interferometry”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, N°1, pp. 8 – 20, January 2001
- [43] A. Ferretti, C. Prati y F. Rocca, “Multibaseline InSAR DEM Reconstruction: The Wavelet Approach”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 37, N°2, March 1999
- [44] R. Scharroo and P. N. A. M. Visser, “Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites”, *Journal of Geophysical Research.*, 103, C4, 8113-8127, 1998
- [45] Atlantis Scientific Inc., *EVInSAR version 1.2 User Guide*, Ontario, 1999
- [46] B. Delaunay, "Sur la sphere vide", *Bull. Acad. Sci. USSR VII: Class. Scil, Mat. Nat.*, págs. 793-800, 1934
- [47] D. Watson, "Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with applications to Voronoid polytopes", *Computer Journal*, Vol. 24, págs 167-172, 1981
- [48] G. Taubin, "A Signal Processing Approach to Fair Surface Design", *Computer Sciences*, RC-19923(#88210), 1995
- [49] Atlantis Scientific Systems Group, *Earth View version 4.4 Command Directory*, Ed. Atlantis Scientific Systems Group Inc., Ottawa, Canada, 1996.
- [50] Página Web del International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, <http://www.itc.nl/ilwis/>, 2004
- [51] M. Vénere y A. Clausse, “A computational environment for water flow along floodplains”, *International Journal on Computational Fluid Dynamics*, Vol 16, pp. 327-330, 2002

# A1

## CURRÍCULUM VITAE

### Datos Personales

Apellido	Euillades
Nombres	Pablo Andrés
Lugar de Nacimiento	Luján de Cuyo, Mendoza, Argentina
Fecha de Nacimiento	12 de Diciembre de 1974
Estado Civil	Soltero
Nacionalidad	Argentino
Pasaporte / DNI	24206144 (Argentino)
Dirección de Email	peuillad@cediac.uncu.edu.ar
Teléfono particular	+54-261-4987498
Teléfono oficina	+54-261-4205115 ext. 2100
Fax	+54-261-4380120
Dirección particular	Puerto Madryn 872 – Luján de Cuyo - Mendoza

### Títulos Obtenidos

1998 – Ingeniero de Petróleos: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.

### Idiomas

Inglés: Habla, lee y escribe.  
Portugués: Habla, lee y escribe.  
Francés: Lee.  
Italiano: Habla y lee.

## **Becas y Reconocimientos Obtenidos**

2003 – Beca ASI (Agenzia Spaziale Italiana) para desarrollar sistemas de alerta temprana de emergencias y prevención de epidemias, de 4 meses de duración, otorgada por el Gobierno Italiano y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)

2002 - Premio REPSOL YPF a la Innovación Tecnológica en las Industrias del Petróleo, Petroquímica, Gas y Electricidad, por el *proyecto "Trazado Optimo de Ductos con Técnicas de Computación Evolutiva guiado por Características a partir de Modelos de Elevación del Terreno, Datos de Imágenes Satelitales y de un Sistema de Información Geográfico"*

Junio y Julio 2001 – Beca FOMEC de la Universidad Nacional de Cuyo para realizar trabajo relacionado con la Tesis de doctorado en la Fac. de Ciencias Exactas de la Univ. Nac. del Centro de la Pcia. de Bs. As., Tandil.

2000 - Mención Especial del premio REPSOL YPF a la Innovación Tecnológica en las Industrias del Petróleo, Petroquímica, Gas y Electricidad, por el proyecto *"Desarrollo de un modelo digital de elevación para una cuenca petrolera mediante interferometría de imágenes de radar"*

1 de Abril de 1999 – Hoy Becario del CONICET (Beca Interna de Formación de Posgrado Libre) para el desarrollo de la Tesis Doctoral en el Tema: *"Desarrollo de algoritmos para la construcción de Modelos Digitales de Elevación por medio de Interferometría con Imágenes de Radar"*.

1997 –1998 Abanderado de la Facultad de Ingeniería – Univ. Nacional de Cuyo.

Diciembre 1997 - Beca para realizar el curso “Enhanced Oil Recovery Fundamentals”, otorgada por YPF S.A., 1997

## **Cargos actuales**

Becario del CONICET para Formación de Posgrado.

Coordinador de la División Imágenes Satelitales del Insituto CEDIAC – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Cuyo.

Profesor libre de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo.

## **Cursos y conferencias dictados**

2001 – Dictado del Curso *"Introducción al Tratamiento de Imágenes Satelitales"*. Curso de 20 hs de duración, en la Facultad de Ingeniería de la UNCuyo, Mendoza.

2000 – Presentación “*Imágenes Satelitales en Gestión Ambiental*”, como expositor invitado en la inauguración de la Maestría en Gestión Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo.

## **Proyectos de Investigación y Desarrollo**

Investigador participante en el Proyecto de Investigación Plurianual n°1262, “Desarrollo e Integración de Metodologías Numéricas Orientadas a la Simulación y Evaluación de Inundaciones con Imágenes Satelitales y Técnicas de Inteligencia Artificial”, financiado por el CONICET.

Director del proyecto de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Cuyo "Detección de Deformación Superficial relacionada con el Sismo del 2 de Julio de 2002 (Pie de Palo - San Juan) mediante Interferometría y GPS"  
2002 – 2004

Investigador participante en el proyecto de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Cuyo “Detección de Hidrocarburos en Superficie mediante Imágenes Hiperespectrales”  
2002 – 2004

Participación en los experimentos de calibración del satélite EO1 (perteneciente a la NASA) y SAC-C (Argentina) realizados durante el mes de diciembre de 2002 en el salar de Arizaro(Provincia de Salta), junto a personal de la CONAE(Argentina) y de la NASA (EEUU).

Participación como investigador en el proyecto de la CIC(Pcia. de Buenos Aires), titulado “Sistema de soporte de previsión y mitigación de inundaciones en la Provincia de Buenos Aires. Aplicación a la Cuenca del Arroyo del Azul.”  
Desde 2002

Participación como investigador en el PID 165 de la Agencia de Promoción Científica y Tecnológica, titulado “Sistema de soporte de decisiones para el manejo de extremos hídricos superficiales en áreas de llanura”  
Desde 2001

Proyecto GEMAS (Gestión de Emergencias Mediante Análisis Satelital), en conjunto con la CONAE y la Universidad de Hawaii.  
Desde 2001.

Participación en el Proyecto BODEGA (Barrancas Dense GPS Array), en conjunto con la Universidad de Hawaii.  
Desde 2001.

Participación en los experimentos de calibración del satélite EO1 (perteneciente a la NASA), realizados durante el mes de enero de 2001 en la Pampa del Leoncito (Prov. San Juan), junto a personal de la Universidad de Arizona (EEUU), Universidad de Colorado (EEUU), Jet Propulsion Lab (EEUU), TRW S.A. (EEUU), CONAE (Arg.) y Universidad de La Rioja (Arg.).

Participación en el Proyecto MATE (Multidisciplinary Active Tectonic Experiment), en conjunto con la Universidad de Hawaii.  
Desde 2000.

Proyecto de Innovación Tecnológica acordado con ASTRA C.A.P.S.A.  
Título: *“Desarrollo de un Modelo Digital de Elevación para una Cuenca petrolera Mediante Interferometría de Imágenes de Radar”*  
Diciembre 2000 – Noviembre 2001

Proyecto de Innovación Tecnológica acordado con Pan American Energy  
Título: *“Trazado óptimo de ductos con técnicas de computación evolutiva a partir de modelos de elevación del terreno y datos de imágenes satelitales”*  
Diciembre 2000 – Diciembre 2001

Proyectos Bianuales de la Secretaría de Ciencia y Técnica (Universidad Nacional de Cuyo)  
Título: *“Simulación numérica de fenómenos aluvionales en la Cuenca del Río Mendoza”*  
1999 – 2002

## **Trabajos realizados**

### **Publicaciones en Revistas Indexadas con Referato**

Euillades, P., Vénere, M., *“Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros”*, Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol 19, N°1, paginas 33-44, 2003.

### **Publicaciones en Revistas no Indexadas con Referato**

Euillades, P., Blanco, M., Bonfils, V., Vénere, M., *“Ajuste de Modelos de Elevación del Terreno Mediante Puntos Medidos en el Terreno”*, Mecánica Computacional, Vol XIX, pp, 2000

### **Presentaciones a Congresos Internacionales**

Borgström S., Casu F., Del Gaudio C., De Martino P., Euillades P.A., Grosse P., Manzo M., Ricciardi G.P., Ricco C., Siniscalchi V., Zeni G. y Lanari R., *“Geodetical monitoring of the Phlegrean Volcanic District (Naples, Italy)”*, aceptado para su presentación en el 5th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology, Thessaloniki, Grecia, 14-20 de Abril de 2004

Euillades P., Vénere M., Clause A., Vives L., Varni M., Usunoff E., *“Modelos Digitales de Elevación para Simulación Computacional de Inundaciones: Interferometría vs. Cartografía”*, First South-American Congress of Computational Mechanics MECOM2002, Santa Fe - Paraná (Argentina), 28-31 Octubre 2002

Euillades, P., Vénere, M., “*Interferometric Digital Elevation Model of Mendoza Province*”, 29<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment, Buenos Aires, April 8 – 12, 2002

Euillades, P., Vénere, M., “*Corrección de Modelos Digitales de Elevación basada en la utilización de una red de puntos medidos en el terreno*”, II Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Guanajuato, 17-19 de enero de 2002

Blanco, M. Bonfils, V., Euillades, P., “*Modelo Topográfico de los Yacimientos Chihuido de la Salina Norte, Chihuido de la Salina Sur y El Portón*”, III Workshop Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Puerto Iguazú, 8 al 12 de Mayo de 2000

### **Presentaciones a Congresos Nacionales**

Euillades P., Vénere M., Clause A., Vives L., “*Modelos de Elevación y su Importancia en la Simulación de Inundaciones*”, XIX Congreso Nacional del Agua, Villa Carlos Paz (Córdoba - Argentina), 13 - 16 de Agosto de 2002

Bonfils, V., Blanco, M., Euillades, P., “*Análisis Multitemporal*”, Jornadas Argentinas de Teleobservación, Buenos Aires, Argentina, Junio 1998.

Bonfils, V., Blanco, M., Euillades, P., “*Modelo Numérico Topográfico e Imagen 3D de la Cuenca del Río Mendoza*”, Jornadas Argentinas de Teleobservación, Buenos Aires, Argentina, Junio 1998.

Bonfils, V., Blanco, M., Euillades, P., Mingorance, F., “*Sensores Remotos en Tectónica Activa*”, Jornadas Argentinas de Teleobservación, Buenos Aires, Argentina, Junio 1998.

Bonfils, V., Blanco, M., Euillades, P., “*Análisis Multitemporal*”, VIII Jornadas de Exposición de Desarrollos e Investigaciones del CEDIAC, FI, UNCuyo, Mendoza, 1998

Bonfils, V., Blanco, M., Euillades, P., “*Modelo Numérico Topográfico e Imagen 3D de la Cuenca del Río Mendoza*”, VIII Jornadas de Exposición de Desarrollos e Investigaciones del CEDIAC, FI, UNCuyo, Mendoza, 1998

### **Actividades de Transferencia a Terceros:**

“Construcción y ajuste de un Modelo Digital de Elevación por medio de Interferometría de Radar del Área Gan Gan – Cañadón Asfalto (Provincia de Chubut)”  
Convenio realizado Inst. CEDIAC – Wintershall SA  
Febrero 2003

“Procesamiento y georreferenciación de Imágenes Satelitales Landsat y Aster de la las Provincias de Chubut y Río Negro”  
Convenio realizado Inst. CEDIAC – Wintershall SA

Diciembre 2002

*“Procesamiento y georreferenciación de Imágenes Satelitales de Laguna Llacanelo – Mendoza”*

Convenio realizado Inst. CEDIAC – YPF SA

Octubre 2001

*“Procesamiento e Impresión de Imágenes Satelitales de Cabo Vírgenes – Provincia de Santa Cruz”*

Convenio realizado Inst. CEDIAC – SIPETROL S.A.

Diciembre 2000

*“Procesamiento e Impresión de Imágenes Satelitales del Gran Mendoza”*

Convenio realizado Inst. CEDIAC – Instituto de Hidráulica.

Noviembre 2000

*“Procesamiento y georreferenciación de Imágenes Satelitales de los Yacimientos Barrancas, Vizcacheras y La Ventana”*

Convenio realizado Instituto CEDIAC – ASTRA C.A.P.S.A.

Marzo 2000

*“Procesamiento y georreferenciación de Imágenes Satelitales de la Cuenca Neuquina”*

Convenio realizado Instituto CEDIAC – ASTRA C.A.P.S.A.

Octubre 1999 – Febrero 2000

*“Procesamiento de Imagen Satelital del Valle de Uco (Tupungato – Tunuyán)”*

Convenio realizado Instituto CEDIAC – Ruiz y Asoc. Consultora S.R.L.

Abril 1999 – Mayo 1999

*“Modelo Topográfico de los Yacimientos Chihuido de la Salina Norte, Chihuido de la Salina Sur y El Portón”*

Convenio realizado Instituto CEDIAC – ASTRA C.A.P.S.A.

Julio 1998 – Mayo 1999

*“Procesamiento de Imágenes Satelitales de la zona del Golfo San Matías – Ciudad de San Antonio Oeste”*

Convenio realizado Instituto CEDIAC – Green Consultores

Septiembre 1998

*“Procesamiento y Composición de Imagen Satelital del Área Tupungato-Refugio”*

Convenio realizado Instituto CEDIAC – Petrolera Santa Fe S.A.

Enero de 1998 – Abril de 1998

*“Transferencia de Información Científica al Sistema de Gestión Ambiental de MAHPI – RRLC”*

Convenio realizado Instituto CEDIAC – Refinería Luján de Cuyo, YPF S.A.

Agosto de 1997 – Febrero de 1998

## Cursos Realizados

2003 – Cursos “*Imágenes y Teleobservación*”, “*Lenguaje de programación C*”, “*Synthetic Aperture Radar*” y “*Programación paralela*”, realizados en el Instituto Gulich (Falda del Carmen – Córdoba) en el marco del programa de becas de la Agencia Espacial Italiana 2003.

2000 – Curso “*Sensores Remotos y Aplicación de GPS*”, de 40 horas de duración, dictado por el Dr. Benjamin Brooks (Pacific GPS Facility – University of Hawaii).

2000 – Curso “*Metodología de la Investigación Científica*”, de 50 horas de duración, dictado por el Dr. Luis Marone (CONICET – CRICYT).

2000 – Curso “*Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR), SAR processor and Interferometry*”, de 32 horas de duración, Dictado por el Dr. Ian Cumming (Universidad de Columbia Británica, Canadá) en el marco del Programa Universitario de GLOBESAR2.

2000 – Curso “*APP and EV-Insar Training Course*”, realizado en la ciudad de Ottawa, Canadá, entre los días 21 de febrero y 10 de marzo de 2000, en las instalaciones de Atlantis Scientific Inc.

1999 – Curso “*Métodos Numéricos I*”, de 60 hs de duración, Dictado por el Dr. Richard Branham (CRICYT)

1999 – Curso “*Programación C++ con introducción a programación Windows*”, de 38 horas de duración, dictado por el Dr. Richard Branham (CRICYT- CONICET)

1999 – Curso “*Métodos Matemáticos*”, de 60 horas de duración, Dictado por el Dr. Claudio Padra y el Dr. Fernando Basombrío (Instituto Balseiro)

1998 – Curso “*Visualización con computadoras – Aplicación a la Interpretación de datos en Ingeniería*”, de 40 hs de duración, dictado por el Dr. Marcelo Venere (Instituto Balseiro – Bariloche)

1998 – Curso “*Dinámica de Aerosoles*”, de 60 hs de duración, dictado por la Dra. Esther Hontañón (CIEMAT – España)

1998 – Curso de *Control de Surgencias (Nivel Supervisor)*, dictado por el Ing. Daniel Greco (Escuela Argentina de Control de Surgencias, Mendoza)

1998 – Curso *Métodos Numéricos con C++*, de 20 hs de duración, Dictado por el Dr. Richard Branham (CRICYT-Mendoza)

1998 – Curso sobre *Principios de Estratigrafía*, dictado por el Lic. Víctor Ploszkiewicz y el Dr. Gualter Chebli, entre el 27/04 y 29/04 (IAPG, Ciudad de Buenos Aires)

1997 – Curso “*Enhanced Oil Recovery Fundamentals*”, dictado por el Dr. Larry Lake entre el 18 y 19 de diciembre (Society of Petroleum Engineers, Ciudad de Buenos Aires)

1997 – Curso de *Sistemas de Información Geográficos y Teledetección*, de 25 hs de duración (Geogestión, Ciudad de Buenos Aires)

1997 – Curso de *Interpretación de Imágenes Satelitales*, dictado por el Dr. Alfredo Prelat (TEXACO), entre el 19 y 21 de Mayo. (CONAE-Ciudad de Buenos Aires)

1996 – Curso “*Introducción a la Teledetección y Sistemas de Información Geográfica*”, de 21 hs de duración dictado por los Ing. Guillermo Ibáñez y José Kuba. (UNC-Mendoza)

1996 – *Curso de Sistema Operativo UNIX-Filosofía y Arquitectura*, de 20 hs de duración (CRICYT – Mendoza)

1996 – *Curso de Sistema Operativo UNIX-Básico*, de 36 hs de duración (CRICYT – Mendoza)

1987 – *Curso de Dactilografía* (Certificado otorgado por el SUPE-Mendoza)

1987 – Curso de Programación en lenguajes FORTRAN, COBOL y BASIC (Certificado otorgado por el SUPE-Mendoza)

# A2

**PUBLICACIONES CON REFERATO**

## Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros

Pablo Euillades

Instituto CEDIAC – Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional de Cuyo  
CC 405, 5500 Mendoza, Argentina  
Tel: 54-261-413 50 00 ext. 2100, Fax: 54-261-438 01 20  
e-mail: peuillad@cediac.uncu.edu.ar

Marcelo Vénere

PLADEMA – CNEA  
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires  
ISISTAN, Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina  
e-mail: venerem@exa.unicen.edu.ar

### Resumen

El presente trabajo propone una metodología que, basada en una serie de transformaciones, permite corregir un modelo digital de elevación a partir de un conjunto de mediciones en el terreno consideradas como puntos seguros. En primer lugar se analizan movimientos rígidos del modelo en las direcciones cartesianas de forma de minimizar el error cuadrático medio en los puntos seguros. A continuación se proponen dos tipos de transformaciones, una que genera deformaciones sobre grandes extensiones y otra para un ajuste puntual. Finalmente se analiza el impacto de las mismas con un ejemplo real, utilizando un conjunto de puntos para calcular y aplicar las transformaciones y reservando un segundo conjunto independiente del primero para verificar el comportamiento del error.

### DIGITAL ELEVATION MODEL CORRECTION BASED ON A SECURE SET OF MEASURED POINTS

### Summary

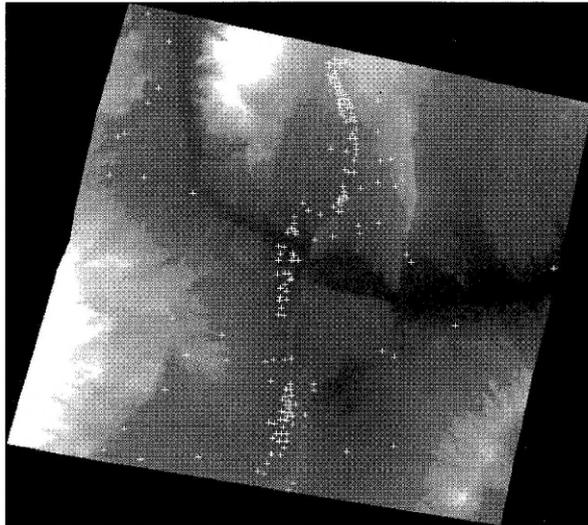
In this paper we propose a digital elevation model correction method based on ground control points (GCP). The method comprises: 1) the application of rigid shifts which minimize misfit to the data in a least squares sense, both in  $xy$  and in  $z$  directions, and 2) the application of deformations to correct regional and localized errors. Regional deformation is achieved using a piece-wise linear interpolation, while localized errors are corrected solving a Laplace equation. The proposed method is applied to real data from an interferometric DEM using two independent point sets, one for correction, and the other to verify the error behavior.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente es posible reconstruir topografía utilizando imágenes satelitales tomadas bajo ciertas condiciones especiales, generando de esta manera modelos digitales de elevación (MDE's) caracterizados por cubrir áreas extensas. El principal atractivo de estos métodos es que son relativamente automáticos y económicos. Sin embargo, existen una serie de factores inherentes a la fuente de información utilizada que introducen errores que afectan al resultado final, lo cual plantea la necesidad de verificar y corregir de alguna manera el MDE, siendo una posibilidad el utilizar puntos medidos en el terreno para efectuar tal corrección.

En el presente trabajo se propone una técnica de corrección de MDE's que combina transformaciones rígidas con deformaciones de la superficie, basadas en una serie de puntos medidos en el terreno. El objetivo del método propuesto es realizar la corrección del MDE de manera tal que se ajuste a la forma de la superficie terrestre de la mejor manera posible, en base a la información disponible. La idea detrás de este objetivo es que es posible combinar la información extensiva, como es el modelo construido a partir de imágenes satelitales, con la información localizada y de alta precisión constituida por puntos medidos en el terreno, obteniendo como resultado una combinación de lo mejor de cada fuente.

Como ejemplo ilustrativo del procedimiento de corrección se utilizará un MDE obtenido mediante la técnica de estereoscopia<sup>1</sup> a partir de un par de imágenes ópticas SPOT<sup>2</sup>. El área cubierta por el mismo es de 2289,160 km<sup>2</sup> y la resolución espacial es de 20 m. Se ha utilizado un conjunto de 187 puntos medidos en el terreno para efectuar el ajuste, los cuales se muestran sobre el MDE en la Figura 1. Asumiremos que los puntos utilizados para corregir no tienen error en cota.



**Figura 1.** Modelo digital de elevación y localización de los 187 puntos seguros utilizados para ejemplificar los algoritmos propuestos. La resolución espacial del MDE es de 20 metros y cubre un área de 2289.169 km<sup>2</sup>

El trabajo está estructurado de la siguiente manera: en primer lugar se describe cómo han sido calculadas las transformaciones rígidas que se aplican al MDE, de manera de ajustarlo lo mejor posible sin modificar su forma. Luego se plantea una serie de deformaciones que permiten mejorar la fidelidad del ajuste. Finalmente se aplica la metodología propuesta a un caso real, utilizando un conjunto de puntos de corrección y verificando los resultados mediante un segundo conjunto de puntos de control, independiente del primero.

## TRANSFORMACIONES RÍGIDAS

Un primer paso a seguir es el de aplicar al MDE movimientos rígidos que permitan situarlo en una posición óptima respecto de la nube de puntos de corrección. Estos movimientos a aplicar pueden ser divididos en movimientos en el plano  $xy$  y movimientos en  $z$ , ya que es necesario tratarlos por separado.

Suponiendo en primera instancia que el modelo está perfectamente georreferenciado y solamente tiene errores atribuibles a un desplazamiento en  $z$ , es posible ajustarlo planteando la minimización del error en cota en algún sentido.

### Desplazamiento en $z$

El criterio elegido para calcular el desplazamiento que es necesario aplicar al MDE es la minimización de la suma del cuadrado de los errores puntuales, esto es, mínimos cuadrados. Este cálculo lleva a la obtención de un desplazamiento necesario según la ecuación

$$d = \frac{\sum(z_p - z_s)}{n} \quad (1)$$

en donde  $d$  es desplazamiento,  $z_s$  cota del MDE y  $z_p$  cota del punto medido. La sumatoria se extiende al número de puntos medidos  $n$ .

En el ejemplo que nos interesa, se obtuvo un desplazamiento necesario de  $-49,44$  metros, que se aplica rígidamente a todo el MDE.

### Desplazamiento en el plano $xy$

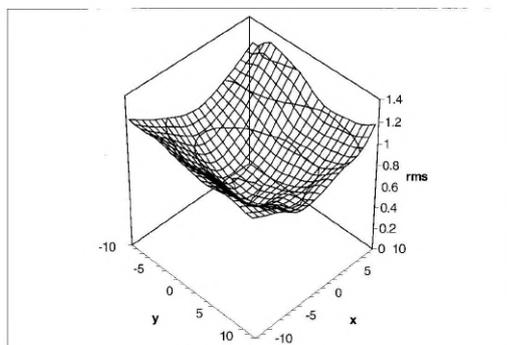
Asumamos ahora que la georreferenciación del MDE no es perfecta. Esto nos deja la libertad de desplazar horizontalmente todo el modelo, lo cual puede ser hecho de forma de minimizar el error del MDE con respecto a los puntos de corrección. Si definimos este error como la suma de los cuadrados de las diferencias entre el MDE y los puntos

$$rms = \frac{\sqrt{\sum(z_p - z_s)^2}}{n} \quad (2)$$

el procedimiento requerirá evaluar esta magnitud en todos los puntos de un dominio cercano al punto de partida, que es la georreferenciación original obtenida manualmente a partir de la correlación de formas visibles en una imagen satelital. La experiencia indica que el error cometido en este procedimiento no debería superar el 2 % del tamaño del MDE, por lo que en este caso un valor adecuado para el dominio de búsqueda implica analizar desplazamientos de 21 pixels en cada dirección.

El procedimiento entonces consiste en evaluar  $d$  de la ecuación (1) para un dado desplazamiento  $xy$  del MDE y calcular el error  $rms$  remanente luego de aplicar el desplazamiento  $d$  en vertical. Esto se debe realizar sobre todo el espacio de búsqueda (en este caso 441

evaluaciones) y quedarnos con el desplazamiento  $xy$  que minimiza el error  $rms$ . La Figura 2 muestra la superficie de error ( $rms$ ) así obtenida; en ella el mínimo ( $rms = 0,5813$ ) corresponde a un desplazamiento del MDE de 1 pixel en la dirección de  $x$  y 0 pixel en la dirección de  $y$ , lo cual indica una buena georreferenciación original del MDE.



**Figura 2.** Superficie de error para desplazamientos  $xy$  en un dominio de tamaño 21 por 21 pixels alrededor de la posición aproximada. El mínimo en este caso corresponde a un desplazamiento de 1 pixel en dirección  $x$  y 0 pixel en dirección  $y$

Es posible que existan casos que no presenten un mínimo, como por ejemplo un plano horizontal o superficies que acepten deslizamientos sin cambio de forma, pero claramente se trata de situaciones que no revisten de gran interés práctico. En términos generales esta corrección constituye una aproximación válida de solución al problema de georreferenciar en forma precisa un MDE.

## DEFORMACIONES

Una vez que la superficie se desplaza en forma óptima a la nube de puntos de control, es posible que sea necesario aplicar una deformación a la misma que compense los errores residuales. Esta deformación puede ser calculada teniendo en cuenta distintos criterios, por ejemplo: se quiere hacer una corrección más detallada que un plano, o se quiere que cada punto de control sea respetado en forma exacta.

Lejos de ser opuestos, ambos tipos de corrección son complementarios. La clave de esta afirmación radica en el hecho de que, luego de la deformación rígida, es posible obtener una distribución de los residuos indicativa de la existencia de errores regionales distintos en ciertas zonas del MDE y de ajuste óptimo en otras zonas. Esto queda más claro, si el error total luego de las transformaciones rígidas es descompuesto como la suma de una componente regional ( $e_r$ ) de baja frecuencia y una componente local ( $e_l$ ) de alta frecuencia

$$e = e_r + e_l \quad (3)$$

Con este concepto resulta sencillo notar que la corrección del MDE puede ser realizada atendiendo a cada componente por separado. En este trabajo se aplica una interpolación lineal con un filtro pasabajos tendiente a corregir el error regional y una función de corrección obtenida resolviendo una ecuación de Laplace para corregir los errores locales.

### Deformación lineal

El objetivo en esta etapa es obtener una superficie de deformación que propague la información contenida en los puntos de control a las zonas del MDE que caen entre los mismos. De esta manera es posible compensar los errores de tipo regional, esto es, errores de igual signo y magnitud similar que afecten a grandes zonas del MDE.

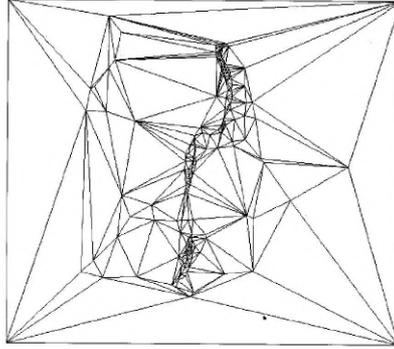


Figura 3. Triangulación obtenida para el conjunto de puntos de corrección del MDE utilizado como ejemplo

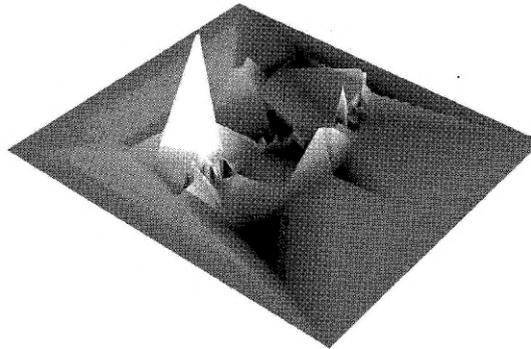


Figura 4. Superficie de corrección lineal construida directamente a partir de una triangulación Delaunay entre los puntos medidos

La superficie de corrección utilizada es una poligonal que conecta a los puntos de control por medio de planos. Con esto lo que se está haciendo es aplicar una interpolación lineal entre los puntos conocidos. Para construir la poligonal se genera la triangulación Delaunay<sup>3,4</sup> del conjunto de puntos de corrección, al que se le agregan las cuatro esquinas del MDE de forma de garantizar que la triangulación cubra completamente al dominio. La Figura 3 muestra esta triangulación para nuestro caso ejemplo y la Figura 4 muestra la superficie de

corrección resultante. Las coordenadas de los nodos se definen

$$\begin{aligned} x_p &= x_p \\ y_p &= y_p \\ z_p &= z_p - z_s && \text{si } p \text{ no es una esquina del MDE} \\ z_p &= 0 && \text{si } p \text{ es una esquina del MDE} \end{aligned} \quad (4)$$

Sin embargo, al interpolar de esta manera entre los puntos de control, además de capturar la deformación regional, esta superficie contiene todas las variaciones locales. Esto conlleva el problema de que, de aplicar así la corrección lineal, se estaría propagando a zonas alejadas del MDE las componentes locales del error total, lo cual no es lícito ni razonable. Una manera de solucionar este problema es aplicar un filtro pasabajos a la poligonal, ya que la componente local del error es típicamente de alta frecuencia. De esta manera se obtiene una poligonal suavizada que solamente contiene la deformación regional.

El tipo de filtro utilizado consiste en una convolución de las coordenadas de los vértices con un *kernel* pasabajos y ha sido descrito en detalle en la referencia 5. Brevemente, dado un conjunto de vértices  $v_i$  que conforman una poligonal en tres dimensiones, es posible definir para cada vértice un subconjunto compuesto por los vecinos de primer orden de  $v_i$ , que son aquellos vértices que comparten con  $v_i$  una cara. El laplaciano discreto de las coordenadas de  $v_i$  queda

$$\Delta v_i = \sum_j w_{i,j} (v_j - v_i) \quad (5)$$

donde la sumatoria sobre  $j$  se extiende a los vecinos de  $v_i$  y los pesos  $w_{i,j}$  son números positivos cuya sumatoria es 1 para cada  $i$ . En este caso se han seleccionado pesos iguales e inversamente proporcionales al número de vecinos  $n_i$  para cada vértice  $v_i$ .

$$w_{i,j} = \frac{1}{n_i} \quad \forall j \quad (6)$$

Las nuevas coordenadas ( $v_i$ ) del vértice vienen calculadas iterativamente con la siguiente ecuación

$$v_j^{k+1} = v_i^k + \{\lambda, \mu\} \Delta v_i^k \quad (7)$$

utilizando alternativamente  $\lambda$  y  $\mu$  en el cálculo y siendo  $k$  el número de iteración. Para que trabaje como un filtro pasabajos, los valores de  $\lambda$  y  $\mu$  deben ser seleccionados de manera tal que

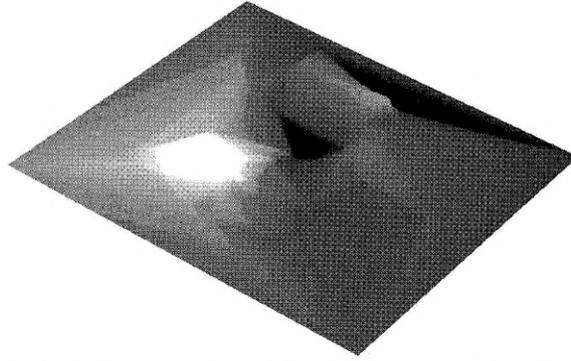
$$k_{pb} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu} > 0 \quad (8)$$

donde  $k_{pb}$  es la frecuencia pasabajos. Para minimizar el número de iteraciones  $\lambda$  debe ser lo más grande posible, pero siempre manteniéndose menor que 1. Los valores elegidos en nuestro caso son  $k_{pb} = 0,1$  y  $\lambda = 0,63$ , con lo cual  $\mu = -0,672$ .

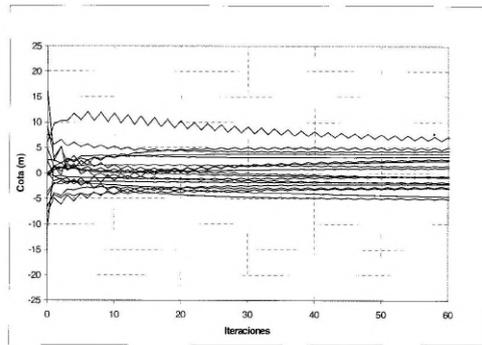
Dado que el objetivo del filtrado en este caso es eliminar la componente local del error en cota, no tiene sentido aplicar el filtro a las coordenadas  $xy$ . Por el contrario, sería erróneo hacerlo, porque modificaría el aspecto de la superficie al modificar la ubicación de los nodos. Entonces, el filtro se aplica solamente a la coordenada  $z$  de los nodos de la poligonal.

La Figura 6 muestra la evolución de las coordenadas  $z_p$  de los puntos de control en función del número de iteraciones para el MDE ejemplo. El proceso se comporta como un proceso iterativo típico y se da por terminado, cuando los valores de  $z_p$  se estabilizan, lo cual, como puede observarse en la figura, requiere pocas iteraciones.

La superficie de corrección finalmente obtenida puede verse en la Figura 5. Esta poligonal se suma pixel a pixel para todo el MDE, que en el caso de nuestro ejemplo introducirá modificaciones entre  $-9,9$  y  $9,4$  metros.



**Figura 5.** Superficie de corrección lineal suavizada mediante la utilización de un filtro pasabajos. Puede observarse que el filtro ha eliminado la variación local del error, conservando su tendencia regional



**Figura 6.** Variación en cota vs. Iteraciones del filtro pasabajos. Se grafican algunos puntos representativos que demuestran que la tendencia se estabiliza rápidamente

### Deformaciones puntuales

La componente local del error es algo más difícil de tratar, ya que no necesariamente existe una función suave que la represente. Básicamente se pretende desplazar el valor de cota del pixel correspondiente al punto de control a su valor correcto, pero esto no puede realizarse aisladamente de su contexto, ya que se generaría una discontinuidad. Una elección mucho más adecuada es afectar a los vecinos con una función que decaiga rápidamente en función de la distancia. Algunos softwares comerciales utilizan funciones de tipo gaussianas para realizar esta interpolación<sup>6</sup>.

Nuestra propuesta es construir una superficie gemela del MDE, donde a cada pixel correspondiente a un punto medido se le asigna el valor de error (diferencia entre la cota dada por el MDE y la cota medida) y a todos los demás pixels se les asigna inicialmente el valor cero.

$$\begin{aligned} E_{i,j} &= z_p - z_s && \text{si existe } z_p \\ E_{i,j} &= 0 && \text{si no existe } z_p \end{aligned} \quad (9)$$

A partir de esta superficie, si  $i, j$  no es un punto fijo, la deformación para cada pixel se calcula según la ecuación

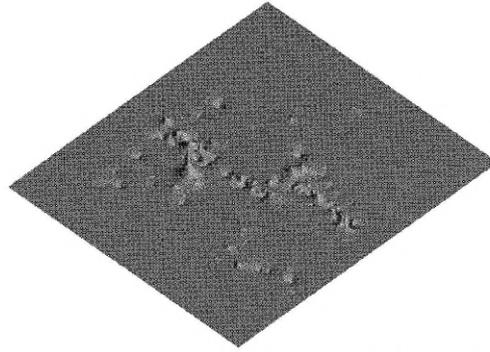
$$E_{i,j} = \frac{E_{i,j+1} + E_{i+1,j} + E_{i,j-1} + E_{i-1,j}}{4} \quad (10)$$

El cálculo se realiza en forma iterativa hasta que

$$\max |E_{i,j}^{k+1} - E_{i,j}^k| < \text{cota} \quad (11)$$

donde  $k$  es el número de iteración.

La ecuación (10) es equivalente a resolver por diferencias finitas un problema de Laplace, donde la variable del problema es el error y los puntos medidos actúan como condiciones de contorno. Esta forma de interpolar resulta conveniente, ya que lo que se obtiene es una función de interpolación suave que evalúa el error en cada punto en base a su distancia al punto medido. Como resultado se obtiene una superficie de error que asigna un desplazamiento particular a cada pixel del MDE y que es función de su distancia a un punto medido y al error encontrado en el mismo. En la Figura 7 se muestra esta superficie para el caso ejemplo que venimos siguiendo, una vez que el MDE fue corregido por medio de la deformación lineal y desplazamientos rígidos.



**Figura 7.** Superficie de deformación puntual obtenida utilizando el conjunto de puntos de corrección en el MDE ejemplo. Nótese que la deformación se introduce en forma únicamente local en las cercanías de cada punto

La implementación de este método en forma directa insuere un elevado número de operaciones para alcanzar convergencia. Por esta razón se ha implementado un algoritmo tipo multigrilla que permite acelerar en buena medida el proceso. Los métodos multigrilla permiten resolver eficientemente ecuaciones diferenciales en derivadas parciales definidas en grillas extensas mediante la aplicación de esquemas de relajación de Gauss-Seidel en grillas menos densas. Esto permite resolver PDE's elípticas discretizadas en una grilla de  $N$  celdas en  $\vartheta(N \times \log N)$  operaciones, mientras que el método directo requiere  $\vartheta(N^2)$  operaciones<sup>7</sup>.

El criterio utilizado para disminuir al máximo el tamaño de grilla radica, en este caso, en que no puede haber más de un punto de control en el mismo pixel de la nueva grilla menos densa. Una vez que se ha determinado cuáles son las dimensiones de la menor grilla posible, se aplican sobre ésta las ecuaciones (9) y (10) hasta que se cumple la condición de convergencia (11). Luego, si denotamos con la letra  $f$  a la grilla más fina y con la letra  $g$  a la más gruesa, se refina la grilla haciendo

$$\begin{aligned} f_{2i,2j} &= g_{i,j} \\ f_{2i,2j+1} &= g_{i,j} \\ f_{2i+1,2j} &= g_{i,j} \\ f_{2i+1,2j+1} &= g_{i,j} \end{aligned} \quad (12)$$

y se itera nuevamente sobre esta grilla hasta alcanzar convergencia. El procedimiento se repite hasta que se ha alcanzado la solución sobre la grilla original.

El esquema de resolución de Gauss-Seidel tiene una convergencia muy lenta. Esto es debido a que en cada iteración un pixel recibe información solamente de sus vecinos y de esta manera la misma se propaga muy lentamente a todo el dominio. La virtud del esquema multigrilla radica en que, al iterar sobre la grilla de menores dimensiones, permite que la información se propague más rápidamente. Luego, en la medida en que se calcula sobre grillas más finas, el algoritmo solamente suaviza los bordes, alcanzando rápidamente convergencia.

#### APLICACIÓN A UN CASO REAL

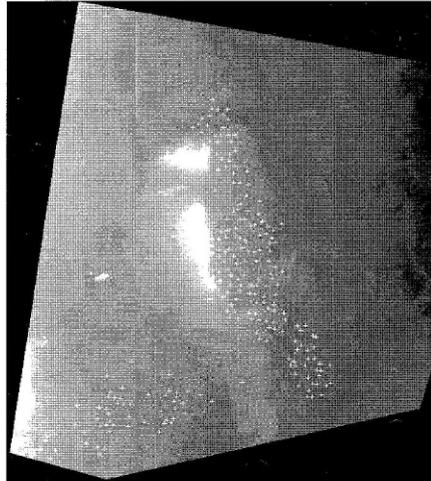
En esta sección se aplica el procedimiento detallado anteriormente a un MDE real obtenido mediante la técnica denominada interferometría de imágenes de radar<sup>8,9,10</sup>. Se utiliza un conjunto de 239 puntos de corrección y se dispone además de un segundo conjunto de 563 puntos que permitirán realizar una verificación del comportamiento de los diferentes algoritmos propuestos. El MDE utilizado cubre un área de 1168 km<sup>2</sup> con una resolución espacial de 20 m. Geográficamente corresponde a la localidad de Barrancas, ubicada al sur de la ciudad de Mendoza, Argentina. Las Figuras 8a y 8b muestran la distribución de los puntos de corrección y de control sobre el MDE respectivamente. Se supone que los puntos medidos están libres de error.

En primer lugar se realizó la corrección por movimientos rígidos. Para el caso del plano  $xy$  se definió un dominio de 51 por 51 pixels alrededor de la posición aproximada. Esta operación dio como resultado un desplazamiento necesario del MDE de 10 pixels en la dirección  $x$  y 0 pixels en la dirección  $y$ , siendo el mínimo un *rms* de 0,519106. La corrección en  $z$  necesaria fue de 13,45 metros.

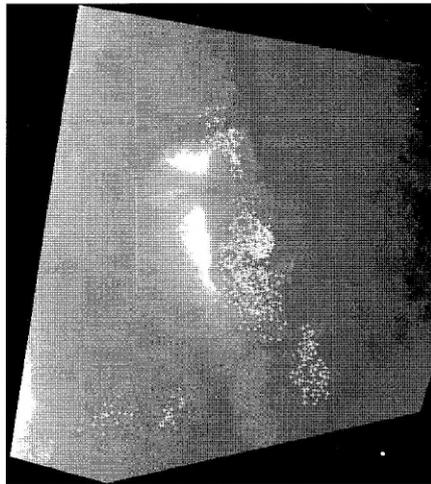
A continuación se deformó el MDE utilizando la interpolación lineal, lo cual requirió construir una triangulación con 488 elementos. Las máximas deformaciones introducidas por este método fueron de -15 y 12,8 m respectivamente. Finalmente se realizó el ajuste local, que introdujo desplazamientos máximos de -19 y 20 m.

Después de cada etapa de corrección se calcularon los errores remanentes utilizando el conjunto de puntos de verificación. La Figura 9 muestra las distribuciones de error para los cinco casos:

- error original (media:  $\mu = 19,607$  m y desviación:  $\sigma = 10,005$  m),
- error después de la corrección en  $xy$  ( $\mu = 14,532$  m,  $\sigma = 8,051$  m),
- error después del desplazamiento en  $z$  ( $\mu = 1,087$  m,  $\sigma = 8,051$  m),
- error después de la corrección lineal ( $\mu = -0,162$  m,  $\sigma = 4,937$  m) y
- error después de la corrección puntual ( $\mu = -0,022$  m,  $\sigma = 5,372$  m).

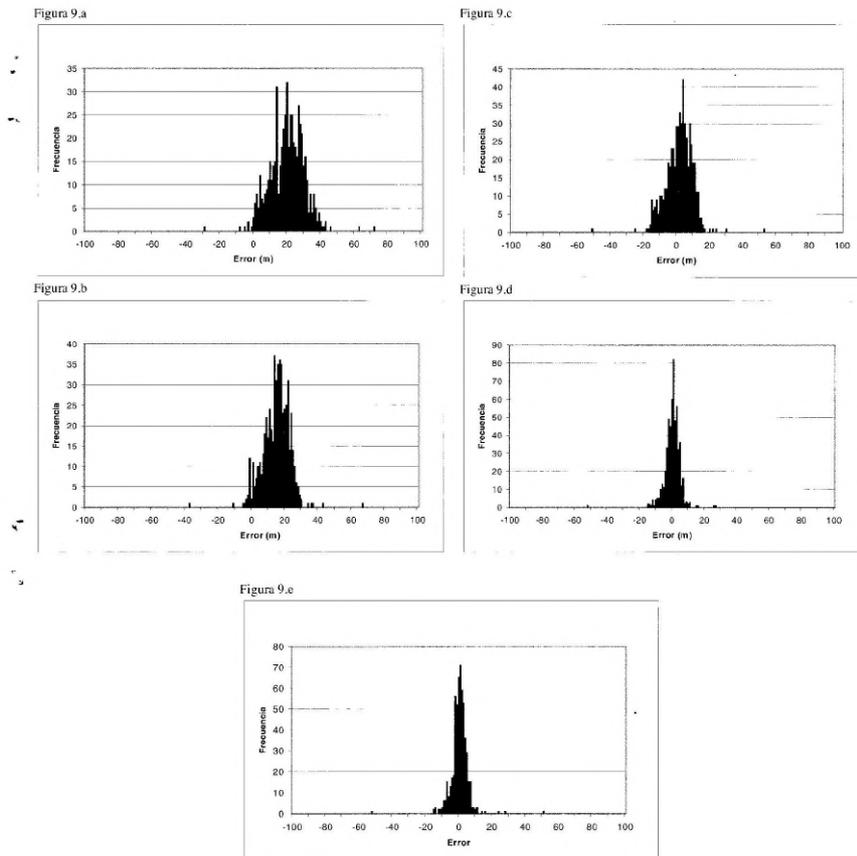


a)



b)

**Figura 8.** a) Distribución de 239 puntos de corrección sobre la superficie del MDE Barrancas. b) Distribución de 563 puntos de verificación utilizados para comprobar el comportamiento del error luego de aplicada la corrección



**Figura 9.** Errores y desviaciones para el MDE Barrancas. a) Situación original ( $\mu = 19.607$   
 $\sigma = 10.005$ )

Obsérvese la notable disminución en  $\mu$  y  $\sigma$  después de cada uno de los pasos de corrección, excepto en la corrección puntual. Esto indica que las etapas de movimientos rígidos y deformación lineal tienen el efecto deseado sobre el MDE. La corrección puntual provoca un leve aumento en  $\sigma$ , pero esto es esperable, ya que el objetivo de esta corrección es forzar cada punto a su posición correcta y esto necesariamente introduce alguna deformación en los puntos vecinos no utilizados en la corrección.

## CONCLUSIONES

Como conclusión podemos decir que los algoritmos propuestos se han comportado de manera satisfactoria en el caso estudiado, ya que han disminuido sensiblemente los

parámetros de medición del error (media y desviación). Teniendo en cuenta que el desnivel existente en el MDE es de unos 300 m, la magnitud de los desplazamientos aplicados es de importancia. La deformación puntual introducida en último lugar produce un pequeño aumento en la desviación del error, que no representa un precio excesivo a pagar por llevar los puntos conocidos a su posición exacta. Además, estos algoritmos pueden ser de ayuda para resolver algunos problemas frecuentes, tal como la georreferenciación precisa de MDE.

Por otra parte, la magnitud de los desplazamientos aplicados al MDE en las distintas etapas de corrección puede servir como indicador de calidad del MDE original, ya sea en sentido absoluto (movimientos rígidos) o relativo (deformaciones).

Finalmente, salvo el algoritmo de corrección puntual, que en algunos casos puede tener un costo computacional importante, los algoritmos propuestos son económicos y pueden utilizarse en un contexto interactivo sin mayores complicaciones.

#### AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) por el apoyo brindado durante la realización del presente trabajo, dentro del Convenio CONAE-CEDIAC.

Al personal de las empresas ASTRA y Repsol YPF por la información aportada, que permitió hacer realidad este trabajo.

Al personal del Pacific GPS Facility de la Universidad de Hawaii por los conocimientos compartidos en todo lo referido a técnicas de medición con GPS.

#### REFERENCIAS

- 1 P.R. Wolf, "*Elements of photogrammetry*", McGraw Hill, International Editions, (1983).
- 2 <http://www.spotimage.com>
- 3 B. Delaunay, "Sur la sphere vide", *Bull. Acad. Sci. USSR VII: Class. Scil. Mat. Nat.*, pp. 793-800, (1934).
- 4 D. Watson, "Computing the  $n$ -dimensional Delaunay tessellation with applications to Voronoid polytopes", *Computer Journal*, Vol. **24**, pp. 167-172, (1981).
- 5 G. Taubin, "A signal processing approach to fair surface design", *Computer Sciences*, RC-19923 (#88210), (1995).
- 6 "Earth View version 4.4 Command Directory", Atlantis Scientific Systems Group Inc. (Ed.), Ottawa, Canadá, (1996).
- 7 D. Ghiglia y M. Pritt, "*Two-dimensional phase unwrapping, theory, algorithms and software*", John Wiley & Sons, Nueva York, EE.UU., (1998).
- 8 R. Gens y J.L. van Genderen, "SAR interferometry -issues, techniques, applications", *Int. J. of Remote Sensing*, Vol. **17**, pp. 1803-1835, (1996).
- 9 F. Rocca, C. Prati y A. Monti Guarnieri, "Possibilities and limits of SAR interferometry", *Image Processing Techniques*, European Space Agency, pp. 15-30, (1996).
- 10 R. Gens, "*Quality assessment of SAR interferometric data*", *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover*, (1998).