

## MODELOS DIGITALES DE ELEVACION PARA SIMULACION COMPUTACIONAL DE INUNDACIONES: INTERFEROMETRIA VS CARTOGRAFIA

Pablo Euillades<sup>\*</sup>, Marcelo Véneré<sup>†</sup>, Alejandro Clausse<sup>†</sup>, Luis Vives<sup>◊</sup>, Marcelo Varni<sup>◊</sup> and  
Eduardo Usunoff<sup>◊</sup>

<sup>\*</sup> CEDIAC. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo  
Centro Universitario - Casilla de Correos 405, 5500 Mendoza, Argentina  
e-mail: [peuillad@cediac.uncu.edu.ar](mailto:peuillad@cediac.uncu.edu.ar)

<sup>†</sup> PLADEMA. Instituto de Sistemas Tandil.  
Universidad Nacional del Centro Provincia de Buenos Aires  
Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina  
e-mail: [venerem@exa.unicen.edu.ar](mailto:venerem@exa.unicen.edu.ar)

<sup>◊</sup> IHLA. Instituto de Hidrología de Llanuras.  
Universidad Nacional del Centro Provincia de Buenos Aires  
Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina

**Key words:** Floodplain Simulation, Interferometric SAR DEMs, DEMs Quality.

**Abstract.** *A numerical study comparing the performance of surface water-flow simulations when using two different digital elevation models (DEM) is presented. The study was carried out over a 10,000 km<sup>2</sup> plain region of the Buenos Aires Province in Argentina. The first DEM was generated using the Triangular Irregular Network (TIN) technique to interpolate from cartography at 1:50,000 scale. The other DEM was constructed by means of interferometric processing from a pair of tandem SAR images. In both cases 20m-size pixels were used. At large scale the general shape of the two models are similar. However, at lower scales the interferometric model shows far more details, like roads sides and local depressions. These low-scale details play a crucial role in surface flow simulation in very flat regions.*

**Resumen.** *Se realizó un estudio sobre una región de llanura de 10,000 km<sup>2</sup> en la provincia de Buenos Aires de Argentina, con el objeto de analizar el comportamiento de la simulación de un proceso de inundaciones, sobre dos modelos digitales de elevación (DEM) diferentes. Por un lado se utilizó un DEM construido a partir de cartografía con escala 1:50,000 empleando la técnica TIN (triangulated irregular network) para interpolar la cota a todo el dominio, y por el otro un DEM generado a partir de interferometría sobre pares de imágenes radar tomadas de satélite. En ambos casos se utilizó un pixel cuadrado de 20 metros. Si bien a gran escala el aspecto de ambas topografías es similar, el modelo generado por interferometría consigue capturar mayores detalles y en este trabajo se muestra que los mismos cumplen un rol importante en el escurrimiento superficial y no pueden ser ignorados sin alterar en gran medida la dinámica de estos procesos.*

## 1 INTRODUCCION

La simulación de problemas de inundaciones en llanuras presenta dificultades que hacen cuestionables la mayor parte de las conclusiones de los pocos trabajos realizados para la llanura Pampeana en Argentina. Quizas uno de los puntos más delicados sea la modelación de la topografía, ya que el poco desnivel de la región convierte en obstáculos importantes a los menores detalles, tales como terraplenes de caminos, construcciones o incluso pequeñas obras realizadas en los campos.

Prácticamente en todos los casos la topografía ha sido generada a partir de cartografía del Instituto Geográfico Militar (IGM), que en su mayoría está disponible en una escala de 1:50000 y con equidistancia entre líneas de nivel de 2.5 metros. A partir de una digitalización de las mismas, la altura se puede interpolar a todo el dominio con la técnica de *Triangular Irregular Network* (TIN), que consiste en construir una triangulación tal que los vértices de los elementos estén ubicados sobre puntos de cota conocida, permitiendo así una interpolación lineal dentro de cada triángulo.

Hoy en día existen varias tecnologías alternativas que permiten generar Modelos Digitales de Elevación (MDE) con un grado de precisión muy superior. Por ejemplo, con equipos laser midiendo desde aviones es posible generar modelos con un pixel de 50 centímetros y precisión de 15 centímetros en altura en forma relativamente rápida (1000 km<sup>2</sup> por día). Otra técnica muy utilizada es estereoscopia óptica, a partir de imágenes tomadas desde diferentes puntos. Esta técnica cobró impulso con el lanzamiento de los satélites de la serie SPOT, diseñados especialmente con este fin. Cometarios y referencias de estas técnicas pueden encontrarse en Gens (1998)<sup>1</sup>.

En este trabajo analizamos una técnica que se presenta como sumamente atractiva para el caso particular de simulación de escurrimientos superficiales conocida como *SAR interferometry* (interferometría a partir de imágenes radar), y realizamos una comparación con el caso de un modelo construido a partir de cartografía para una zona de casi 500,000 hectareas correspondiente a la cuenca del arroyo Azul.

En primer lugar se describe como se construyó, ajustó y validó el modelo digital de elevación (que de ahora en más llamaremos SAR-DEM). A continuación se compara este modelo con el generado a partir de cartografía (al que llamaremos IGM-DEM). Y por último se estudia el comportamiento de los mismos ante un escurrimiento superficial.

## 2 CONSTRUCCION Y AJUSTE DEL SAR-DEM

El principio de la construcción de modelos de elevación a partir de imágenes satelitales radar se basa en los patrones de interferencia que se construyen a partir de dos imágenes radar coherentes de una misma zona tomadas desde ángulos diferentes. Estos patrones estarán directamente relacionados con la topografía de la zona y por lo tanto la información de altura puede ser obtenida a partir los mismos.

El procesamiento necesario involucra una serie de pasos tales como tratamiento de los datos (imagen radar cruda), co-registración de las dos imágenes, generación del

interferograma, conversión de la fase a altura y generación del producto final - Hellwich (1999)<sup>2</sup>. En nuestro caso este procesamiento se realizó con el soft EVInsar 4.1.1 de la empresa Atlantis Scientific Inc. y se trabajó sobre un par de imágenes ERS provistas por la CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales). La figura 1 muestra el modelo así construido para una región de aproximadamente 100km x 100 km, la cual incluye la mayor parte de la cuenca del arroyo Azul.

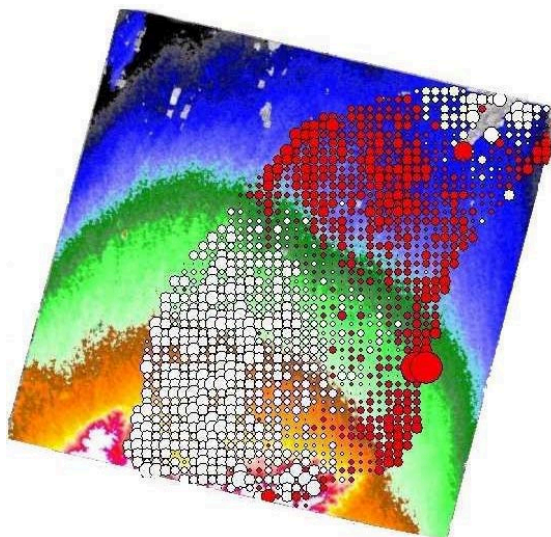


Figura 1: Errores del SAR-DEM medidos sobre una grilla de puntos con cota conocida. Los círculos blancos indican errores positivos y los rojos negativos.

Este modelo, con un pixel de 20 m, debe ser posteriormente validado y ajustado en base a una serie de puntos seguros medidos sobre tierra. La metodología para realizar este ajuste es descrita en detalle en Euillades et al (2002)<sup>3</sup> y básicamente consiste en movimientos rígidos del modelo completo, y dos tipos de deformaciones que permiten corregir tanto las desviaciones en grandes regiones como las locales.

Sobre la misma figura 1 se muestran los errores que presentaba el modelo inicialmente generado, medidos sobre una grilla de puntos con cota conocida. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud del error y el color se utiliza para indicar errores negativos o positivos. Se puede observar que el modelo presentaba una deformación regional ya que tanto la zona sur como el extremo norte tenían cotas por encima de lo correcto, mientras que la zona central se encontraba por debajo.

La figura 2 muestra el modelo luego de ser ajustado mediante una deformación que corrige el desvío regional y los errores remanentes en el mismo. A excepción de unos pocos puntos, estos errores son relativamente bajos (no superan el metro y medio). Los puntos con

diferencias importantes, tales como la zona al este de la cuenca, corresponden a lugares en los que se tenía muy poca coherencia en el par de imágenes radar, y por lo tanto es de esperar que el modelo allí no sea suficientemente confiable.

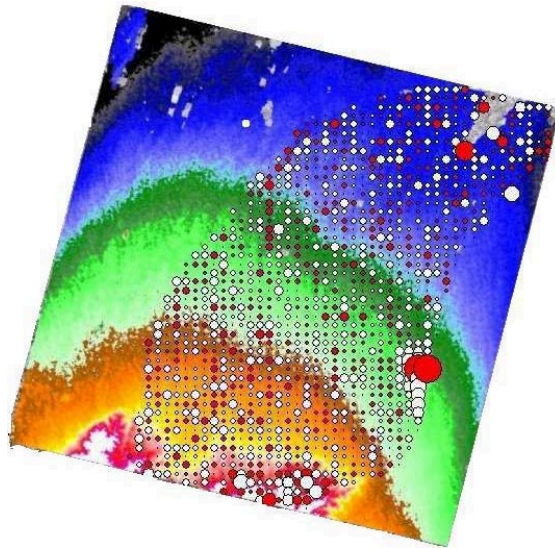


Figura 2: Errores remanentes del SAR-DEM luego de aplicar una deformación regional.

Por último, se decidió hacer una verificación en terreno, midiendo la cota de una serie de puntos independientes, los cuales se muestran en la figura 3. Como puede observarse, el error en los mismos es pequeño a excepción de los dos puntos al este de la cuenca. En general los mismos están por debajo del metro en términos absolutos, lo cual está dentro de los valores relevantes desde el punto de vista de un estudio de inundaciones.

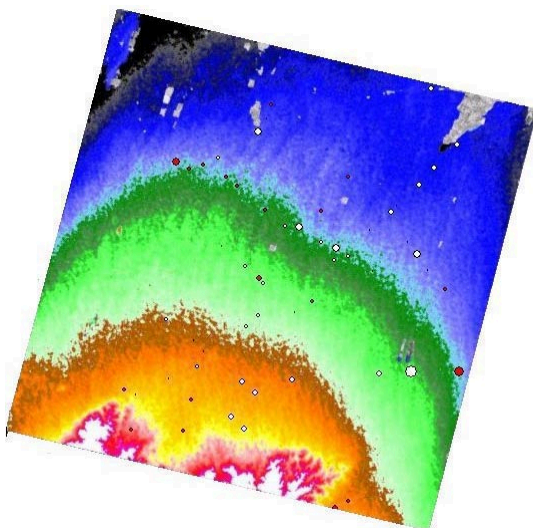


Figura 3: Errores del SAR-DEM evaluados sobre un conjunto de puntos independientes medidos en terreno.

Si bien esta verificación no es suficiente para garantizar cotas de errores inferiores al metro en todo punto del modelo, puede considerarse como un buen indicador de la calidad del mismo.

### 3 COMPARACION DE LOS DOS MODELOS

En la figura 4 se pueden observar los dos modelos contruidos, los cuales a grandes rasgos resultan muy similares (nuevamente a excepción de la zona al este de la cuenca, donde el modelo SAR presenta el error mencionado por falta de coherencia). La similitud puede verse más claramente sobre un corte como el que se indica en la figura 5.

Sin embargo cuando el análisis se realiza a una escala menor, como es de esperar las diferencias entre los dos modelos comienzan a ser importantes. A modo de ejemplo, en la figura 6 se muestra una zona de 4 km de lado en donde son claramente visibles un conjunto de cauces de arroyos secos, un camino rural y una ruta (ruta nacional 226). Como se puede comprobar sobre el perfil indicado en la imagen y graficado en la figura 7, estos elementos no son perceptibles en el modelo construido a partir de cartografía, pero si son razonablemente capturados por el modelo SAR-DEM.

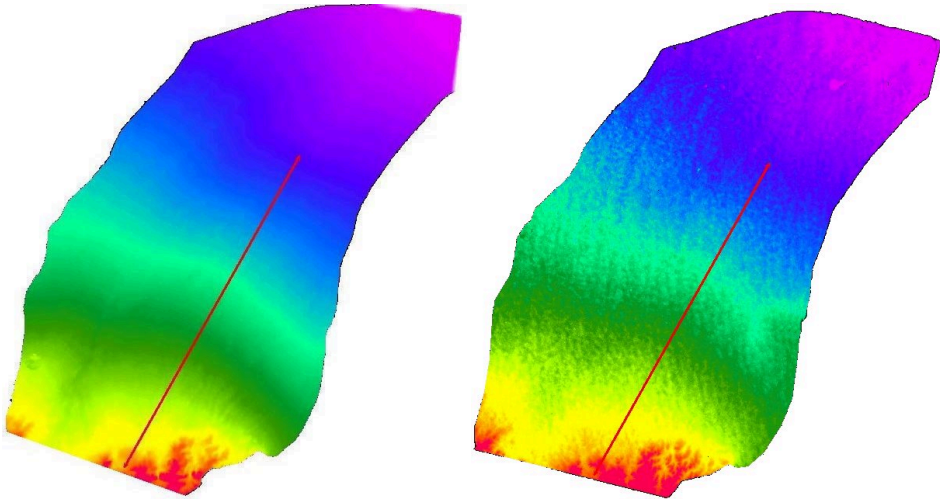


Figure 4: Los dos modelos digitales de elevación construidos, el generado a partir de cartografía a la izquierda y por interferometría a la derecha. La línea trazada corresponde al perfil graficado en la figura 5.

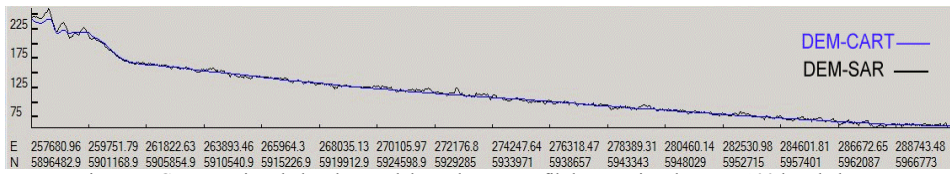


Figure 5: Comparación de los dos modelos sobre un perfil de aproximadamente 100 km de largo

Además pudo comprobarse que este último modelo registra aceptablemente construcciones y edificios de mediano y gran porte, los cuales por supuesto no pueden aparecer en el otro modelo. Obsérvese por ejemplo la imagen de la figura 8 que corresponde al modelo de elevación de la zona del aeropuerto de Azul sobre el que se ha superpuesto la imagen Landsat correspondiente. Es interesante también verificar que el modelo no captura la vegetación, ya que la mancha oscura al costado del edificio del aeropuerto es un monte de Eucalipto con altura comparable al edificio y sin embargo se encuentra a la altura de la pista. Este punto es de vital importancia, y simplifica notablemente el trabajo de generación del modelo, ya que si esto no ocurriera, cada monte de árboles se transformaría en una verdadera barrera y deberían haber sido corregidos uno por uno.

Esta propiedad era esperable ya que la longitud de onda utilizada como señal radar tiene un buen grado de penetración de la vegetación, y sin duda es una de las principales ventajas frente a técnicas como estereoscopia óptica o medición con laser.

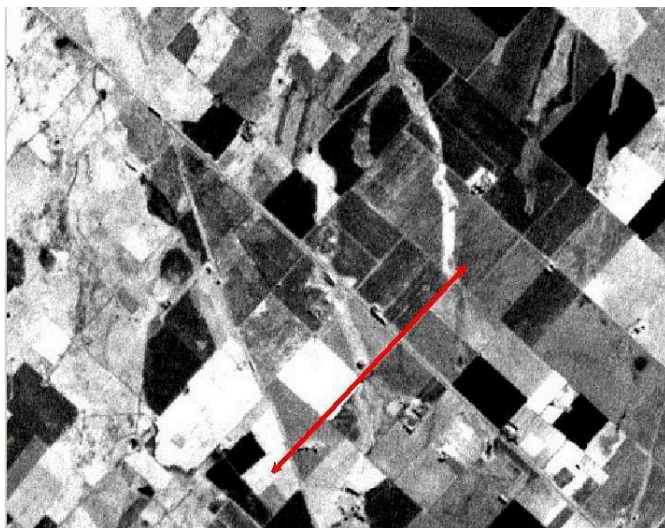


Figura 6: Imagen Landsat de una zona con una ruta y cauces de arroyos secos. La recta corresponde al perfil que se grafica en la figura 7

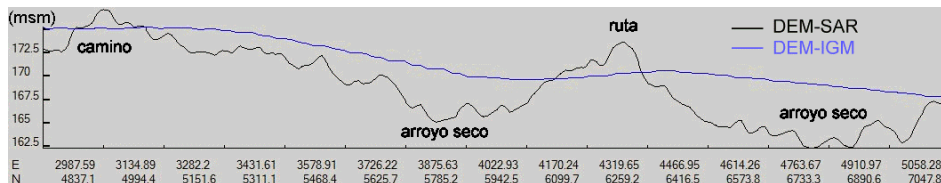


Figura 7: Diferencia entre los dos modelos a una escala de algo más de 2 km. Observese como el modelo basado en cartografía no captura la ruta ni los cauces de arroyo secos, claramente visibles en la imagen Landsat de la figura 6.

Otros elementos que solo aparecen claramente definidos en el modelo SAR-DEM son los pequeños bajos con extensiones de pocas hectareas, característicos de las zonas de llanura de la Provincia de Buenos Aires.

El principal problema que presenta el modelo SAR-DEM son los errores relativamente altos (más de tres metros) en las zonas donde el par de imágenes radar tenían poca coherencia. Esta falta de coherencia es causada por tratarse de zonas que estaban inundadas al momento de la toma de las imágenes (laguna y zonas inundadas generan muy poca respuesta en el radar, porque la señal tiende a reflejarse especularmente). Para corregir este problema pueden adoptarse dos estrategias: utilizar imágenes de épocas secas, o corregir el modelo con una gran densidad de puntos medidos en terreno.

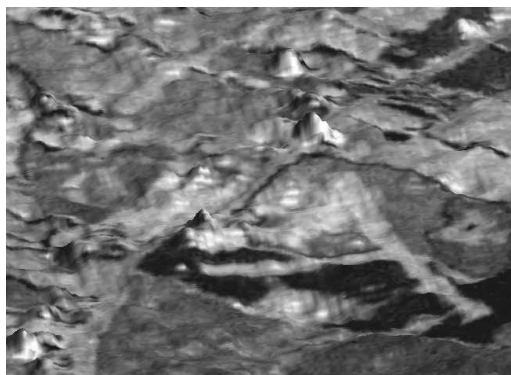


Figura 8: Modelo de elevación de la zona del aeropuerto de azul. Las pequeñas elevaciones corresponden con edificios y la zona más oscura a forestaciones de eucaliptus de la misma altura o más altas que los edificios, lo cual comprueba que la señal radar penetra la vegetación.

#### 4 COMPORTAMIENTO ANTE UN ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

A efectos de analizar la importancia de la presencia o no de estos elementos de la topografía sobre la simulación de un proceso de inundación, se analiza el escurrimiento superficial sobre los dos modelos al considerar el caso de una lluvia homogénea de 100mm sobre toda la región al instante inicial. Se asume además que no existía agua presente en la región y no se considera la infiltración ni la evapotranspiración. Por supuesto, son condiciones totalmente alejadas de la realidad, ya que es sabido que la zona retiene grandes cantidades de agua y que la evapotranspiración es el mecanismo dominante, pero de esta forma logramos aislar fenómenos y facilitamos así su comprensión.

Para la simulación del escurrimiento superficial se utilizó, en ambos casos, un modelo simple desarrollado con el objetivo de poder trabajar con millones de celdas y abarcar así grandes extensiones a costo computacional accesible. El mismo está basado en las ideas presentadas en trabajos como el de Sugumaran et al<sup>4</sup> o Vénere et al<sup>5</sup>.

Como se puede observar en la figura 9 en el caso del modelo IGM-DEM el agua escurre hacia los cauces principales y de allí hacia afuera del dominio; en cambio para el caso del modelo radar se obtiene un rápido escurrimiento hacia los bajos y luego la mayor parte del agua queda retenida en los mismos. El único medio para remover este agua es mediante infiltración o evapotranspiración, que como mencionamos se consideraron nulas. Este mecanismo es conocido en hidrología de llanuras, y de hecho es práctica común en la gestión de los campos resignar la explotación de estos bajos o destinarlos a actividades menos rentables, ya que permanecen anegados la mayor parte del año.



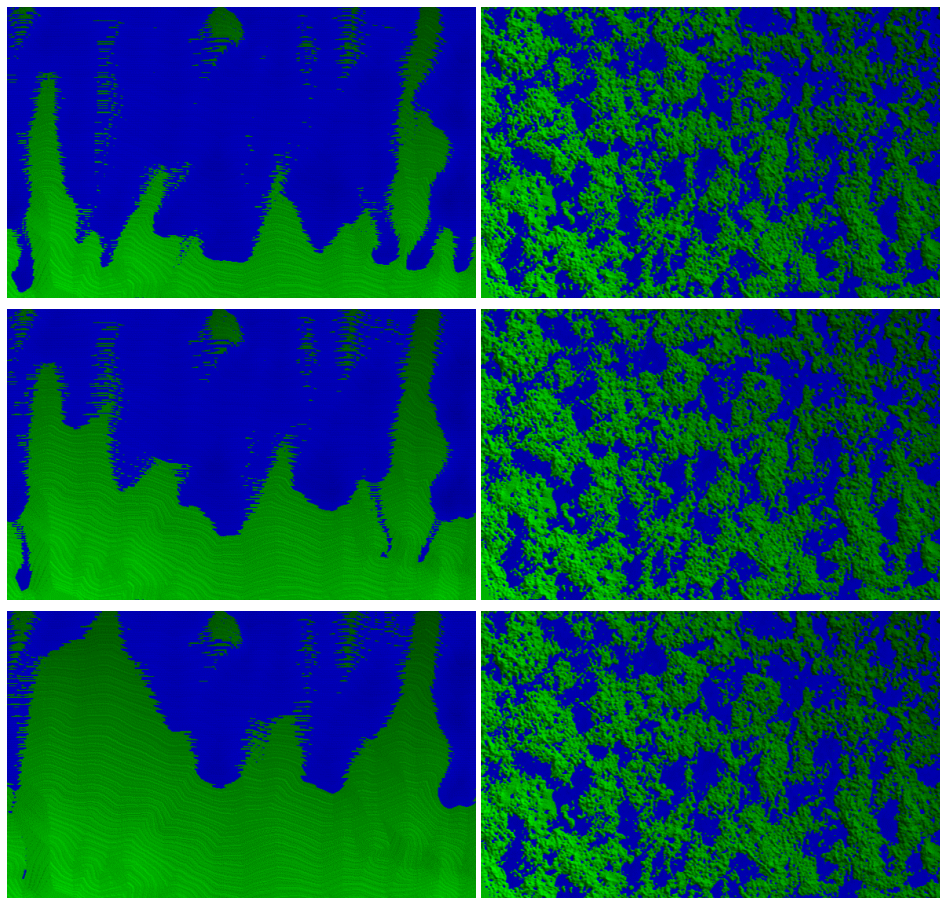


Figura 9: Comparación del escurrimiento superficial sobre los dos modelos en dos instantes de tiempo: IGM a la izquierda y SAR a la derecha.

Menos notable que este efecto, pero igualmente visible en la ampliación que se muestra en la figura 10, es la presencia de una ruta que bloquea en parte el desplazamiento del agua. Es posible que en el lugar existan alcantarillas que alivien este bloqueo y deberían ser consideradas, pero de todas formas resulta interesante comprobar que el modelo construido captura razonablemente los desniveles entre banquina y camino cuando estos son importantes, y que el escurrimiento es sensible a la presencia de los mismos.

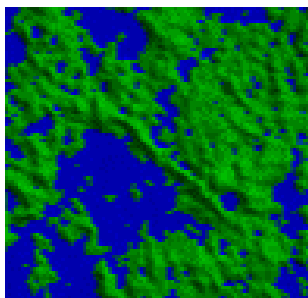


Figura 10: Bloqueo del escurrimiento por la presencia de una ruta.

## 5 CONCLUSIONES

Hemos puesto en evidencia que la calidad y precisión del modelo de elevación cumple un rol preponderante en la simulación del escurrimiento superficial cuando se trata de problemas de inundaciones en llanuras.

De hecho es sabido que los terraplenes de caminos o ferrocarriles pueden transformarse en verdaderos diques en este tipo de regiones, o en el otro extremo, los pequeños arroyos que se activan solamente ante precipitaciones importantes, son los responsables del transporte de la mayor parte del agua que escurre. Y quizás aún más importante, es vital poder considerar los pequeños bajos con superficies que van desde menos de una hectarea hasta algunas decenas o más, ya que son el reservorio de superficie principal en el sistema.

Queda aún por mejorar la precisión absoluta de los modelos generados por interferometría, ya que si bien capturan claramente la mayor parte de los elementos de la topografía, pueden encontrarse regiones con errores que superan el metro, ya sea por problemas de coherencia entre el par de imágenes, como por alteraciones meteorológicas o incluso por la forma de procesamiento. Una propuesta que puede solucionar estas dificultades fué sugerida por Walker et al. (1999)<sup>6</sup> y consiste en utilizar más de un par de imágenes y construir el modelo como un promedio pesado por la coherencia, reduciendo también así los errores originados por el ruido en las señales. Otra alternativa siempre posible es enriquecer la cantidad de puntos considerados seguros que se utilizan para ajustar el modelo, pero esta opción requiere aumentar el trabajo de campo, lo cual por supuesto elevará sensiblemente los costos.

## 6 REFERENCES

- [1] R. Gens, "Quality assessment of SAR interferometric data", *Wissenschaftliche Arbeiten Der Fachrichtung Vermessungswesen Der Universität Hannover*, (1998).
- [2] O. Hellwich, "Basic Principles and Current Issues of SAR Interferometry", *Joint Workshop of ISPRS WG1/1, 1/3 and IV/4, Sensors and Mapping from Space*, (1999)
- [3] P.A. Euillades, M.J. Vénere. "Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros". *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en*

- ingeniería*. Aceptado (2002).
- [4] R. Sugumaran, C. Davis, J. Meyer and C. Fulcher. "Web-Based Decision Support Tool for Floodplain Management Using High-Resolution DEM". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **66**, 1261-1265.
- [5] M. Vénere and A. Clause. "Computation of surface water flow in floodplains". *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. In press (2002).
- [6] A. Walker, J.P. Muller, J.G. Morley, A. Smith, P.S. Naden, "Multi-Pass Interferometric SAR DEMs for Hydrological Network Derivation", *FRINGE'99, Advancing ERS SAR Interferometry from Applications towards Operations*, (1999).