Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica
International Review of Geographical Information Science and Technology

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

INCIDENCIA DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN EN LA CORRECCIÓN GEOMÉTRICA DE DATOS SATELITALES QUICKBIRD: CASO DEL SRTM-C, SRTM-X Y ASTER GDEM

JOSÉ DANIEL LENCINAS[1] y GASTÓN MAURO DÍAZ[2]
Laboratorio de Geomática, Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico
Ruta 259 km 4, 9200, Esquel, Argentina
[1] jdlencinas@ciefap.org.ar [2] gdiaz@ciefap.org.ar

RESUMEN

Se requiere un modelo digital de elevación (MDE) para corregir geométricamente (ortorrectificar) datos satelitales de áreas montañosas. Disponer de MDE con la exactitud necesaria es una dificultad habitual en muchas zonas geográficas, donde los únicos MDE son el SRTM-C, SRTM-X y ASTER GDEM, de cobertura casi global. El objetivo es estudiar la incidencia del error de estos MDE en la exactitud planimétrica de una ortoimagen QuickBird, analizándose un caso de la Patagonia Andina argentina. Para ello se estimó la exactitud altimétrica de los MDE, se ortorrectificó la misma imagen con cada uno de ellos, se compararon sistemáticamente las ortoimágenes entre sí y se estimó la exactitud planimétrica de cada una de ellas. Se concluyó que el error que propagan los MDE es similar en la mayor parte de la ortoimagen. Además, se corroboró que el error propagado está en función de la inclinación del sensor y la forma del relieve.

Palabras clave: ASTER GDEM, exactitud planimétrica, ortorrectificación, puntos de apoyo, QuickBird, RMSE, SRTM.

IMPACT OF DIGITAL ELEVATION MODELS ON GEOMETRIC CORRECTION OF QUICKBIRD SATELLITE DATA: CASE STUDY WITH SRTM-C, SRTM-X AND ASTER GDEM

ABSTRACT

In mountainous areas, digital elevation models (DEM) are required to geometrically correct (orthorectification) satellite data. It is usually difficulty in many geographic areas to have DEMs with the accuracy needed. The only DEMs existing for most cases are SRTM-C, SRTM-X and ASTER GDEM, which have near-global coverage. This paper analyzes a case in the Argentine Andean Patagonia, where the objective is to study the errors in the above mentioned DEMs and

Recibido: 15/7/2011
Aceptada versión definitiva: 3/11/2011
© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

their impact on the horizontal accuracy of a QuickBird orthoimage. Therefore, the vertical accuracy of each DEM was estimated, and a single image was orthorrectified separately with each DEM. The orthoimages were compared systematically amongst them and the horizontal accuracy of each one was estimated. It was concluded that the errors produced by the DEM are similar throughout the whole image. In addition, we confirmed that the error spread is a function of the tilt sensor and landform.

Keywords: ASTER GDEM, ground control point, horizontal accuracy, orthorectification, QuickBird, RMSE, SRTM.

1. Introducción

La corrección geométrica consiste en asignar un sistema de coordenadas cartográfico a los píxeles de los datos brutos de la imagen, inicialmente organizados solamente en líneas y columnas. En el caso de áreas montañosas, el relieve provoca distorsiones de magnitud variable en función de la geometría de observación del sensor, siendo necesario integrar modelos digitales de elevación (MDE) en la corrección geométrica (Itten *et al.*, 1992; Rocchini y Di-Rita, 2005). Ese procedimiento es denominado ortorrectificación (Toutin, 2004) y su efectividad en la corrección dependerá de la calidad de la imagen, los puntos de control en el terreno, el modelo de ortorrectificación y el MDE (Jensen, 2000, 170). Mientras que no es posible intervenir en la calidad de la imagen bruta, es necesario realizar una adecuada elección y configuración de los restantes factores, ya que de esto dependerá la exactitud de la corrección (Cuartero y Felicísimo, 2003).

Los puntos de control en el terreno (o puntos de apoyo, GCP por sus siglas en inglés) se definen como puntos identificables en la imagen de los que se conoce sus coordenadas geográficas. El número y distribución espacial de los GCP depende de varios factores, entre ellos el modelo de ortorrectificación que se utilice (Toutin, 2004). Como estos modelos son tridimensionales (3D), los GCP deben tener la altitud y no sólo las coordenadas planas, como en el caso de los modelos polinomiales (rectificación en dos dimensiones). El término "imagen rectificada" debe reservarse para los datos corregidos con modelos 2D, mientras que aquellos datos corregidos con modelos 3D deben llamarse imágenes ortorrectificadas u ortoimágenes (Cuartero y Felicísimo, 2003). Existen dos tipos de modelos 3D: físicos (también conocidos como paramétricos rigurosos) o empíricos, generalmente en base a funciones racionales (Aguilar *et al.*, 2008; Toutin, 2004). La propagación del error del MDE a las ortoimágenes depende de cuál sea el modelo 3D utilizado. El modelo físico desarrollado por Thierry Toutin del Centro Canadiense de Percepción Remota, de aquí en adelante M3D-CCRS, (Toutin, 1995;Toutin *et al.*, 2002) es el modelo 3D que, hasta el momento, ha demostrado brindar los resultados más precisos (Kay *et al.*, 2003; Sáchez-Martín y Pérez-Gutiérrez, 2005; Aguilar *et al.*, 2008). Debido a su condición de modelo físico, en el M3D-CCRS la propagación del error desde el MDE a la ortoimagen es función de la geometría de observación, específicamente del ángulo de observación fuera del nadir (del inglés *off-nadir view angle*).

Las imágenes satelitales de alta resolución espacial, como IKONOS, QuickBird o GeoEye, suelen adquirirse con geometría de observación fuera del nadir (Toutin *et al.*, 2002). Por lo tanto, para la ortorrectificación de ese tipo de datos es de gran importancia la precisión de los MDE. Sin

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

embargo, la disponibilidad de MDE con la exactitud necesaria es una dificultad habitual en el momento de corregir datos satelitales de áreas montañosas (Lencinas, 2009). Existen MDE disponibles sin costo a través de internet, esto son: el SRTM-C producido con datos radar banda C adquiridos desde un trasbordador espacial durante la misión SRTM [del inglés *Shuttle Radar Topography Mission*, Rabus *et al.* (2003)]; el SRTM-X (© DLR), producido con datos banda X adquiridos al mismo tiempo que los banda C, pero en franjas cuatro veces más angostas, lo que ocasiona vacíos de información entre órbitas adyacentes; y el ASTER GDEM (del inglés *Advanced Spaceborne Termal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model*) producido mediante el procesamiento automático de 1,5 millones de escenas del sensor ASTER (METI, 2009). El SRTM-C tiene una resolución espacial de aproximadamente 90 m, mientras que el SRTM-X y el ASTER GDEM tienen aproximadamente 30 m. Todos ellos son MDE de moderada a baja resolución espacial y, por lo tanto, inadecuados para ortorrectificar datos de alta resolución espacial (Kapnias *et al.*, 2008). Además, su geolocalización está determinada en base a parámetros orbitales, por lo que se espera la existencia de errores sistemáticos de geoposición (Rodríguez *et al.*, 2006; METI, 2009). Por lo tanto, puede ser de utilidad conocer la incidencia del error de los MDE sobre la precisión planimétrica de ortoimágenes desde una perspectiva teórico-empírica. En este trabajo se analiza un caso de la Patagonia Andina argentina, siendo el objetivo estudiar la incidencia del error de los MDE SRTM-C, SRTM-X y ASTER GDEM en la exactitud planimétrica de una ortoimagen QuickBird.

2. Revisión de antecedentes bibliográficos de relevancia

Para evaluar la exactitud planimétrica de una ortoimagen es necesario tomar una muestra de la población de errores a través de puntos de control. En algunos ambientes naturales es difícil encontrar puntos de control, lo que puede provocar baja representatividad de tipos de cobertura en la muestra. Para el muestreo es necesario establecer un diseño que permita: disponer de un método de selección de las unidades que conformarán la muestra, definir el tamaño de la muestra y predecir el grado de fiabilidad de las conclusiones (Steel y Torrie, 1993, 541). Con relación a la distribución espacial de los errores en ortoimágenes de alta resolución espacial de áreas montañosas, se presume que los errores no están distribuidos uniformemente porque el error de los MDE se propaga a las ortoimágenes y estos errores están asociados con la pendiente, orientación y rugosidad del terreno, factores que se distribuyen heterogéneamente en áreas montañosas. Por lo tanto, la distribución no uniforme debería tenerse en cuenta en el diseño de muestreo. En los siguientes apartados se desarrollarán estos conceptos, finalizando en la formulación de la hipótesis del trabajo.

2.1. Métodos para estimar exactitud planimétrica

Si bien no existen estándares internacionales para la evaluación de la exactitud posicional de ortoimágenes de alta resolución, pueden ser de utilidad los estándares del Comité Federal de Datos Geográficos de EEUU (FGDC, 1998) y la guía avalada por la Comisión Europea (Kapnias *et al.*, 2008). En ambos casos se establece que la exactitud debe ser evaluada con puntos de control independientes (ICP, por sus siglas en inglés). Los estándares del FGDC se apoyan en un reporte

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

técnico de la Fuerza Aérea de los EEUU (Greenwalt y Schultz, 1962), donde se establecen las principales ecuaciones utilizadas para estimar exactitud planimétrica y altimétrica (Apéndice 1).

En los estudios relacionados a esta materia suelen utilizarse los términos exactitud y precisión, existiendo cierta confusión al respecto. En cambio, en la bibliografía anglosajona estos términos (*accuracy and precision*) son utilizados con un sentido específico (Foody y Atkinson, 2002, 3). A continuación se establecerá la diferencia entre exactitud, sesgo (en inglés *bias*) y precisión. El sesgo se refiere al error sistemático, la precisión al error aleatorio y la exactitud al error absoluto. Los estadísticos son el error medio, el desvío estándar y el RMSE (del inglés *root mean square error*), respectivamente. Como estos estadísticos son calculados con el valor de error, es necesario disponer de una fuente de referencia para poder estimarlos. La fuente debe ser varias veces más confiable que aquella que se está evaluando, siendo recomendable brindar información complementaria sobre la misma para poder interpretar la fiabilidad de los cálculos.

A modo de ejemplo, primero se considerará un mapa del que se obtendrán los estadísticos media, desvío estándar y RMSE con los errores calculados a partir de puntos de control de una fuente confiable. Como siguiente paso, se cambiarán las coordenadas cartográficas del mapa por unas incorrectas, pero sin alterar su escala. Si se calculan nuevamente los errores y se obtienen los estadísticos, el desvío estándar no cambiará porque cada desvío al cuadrado se calculará como $(error_i - error_{medio})^2$, y el error medio (el error sistemático de cambiar las coordenadas) puede variar sin que la precisión cambie. Por otro lado, el RMSE cambiará cuando cambie el error medio.

Cuando se reporta el ajuste del modelo 3D se reporta la exactitud que se alcanzaría si el error del MDE fuese igual a cero. La interpretación directa de los estándares del FGDC conduce a enunciar: "El cálculo del error planimétrico contenido en la imagen resulta de la comparación, para el conjunto de los puntos de comprobación empleados, entre sus coordenadas verdaderas y las que se obtienen de la imagen corregida" (Corbelle-Rico *et al.*, 2006). Sin embargo, esta práctica incorpora el error al localizar el punto de control en la imagen corregida (*image pointing*), lo que puede ser evitado si el residuo se computa utilizando el modelo 3D ajustado y los ICP. Para ello, es necesario identificar en la imagen bruta al ICP (coordenadas de la imagen) y calcular las coordenadas geográficas con el modelo ajustado, utilizando el valor de altura extraído del MDE que servirá para generar la ortoimagen. Finalmente, se calculará el residuo como la resta entre la geoposición calculada y la observada.

Para evaluar la exactitud planimétrica de imágenes pancromáticas QuickBird se deben utilizar ICP con exactitud decimétrica (Aguilar *et al.*, 2007). Debido a que no suele existir cartografía previa con dicha exactitud, se utiliza el GPS con corrección diferencial (Toutin y Chénier, 2004). Cuando los ICP son medidos en el terreno, se está tomando una muestra de una población finita compuesta por aquellos puntos que pueden ser interpretados en la imagen y mensurados en el terreno. Pero, ¿cuántos ICP deben medirse?

El número de ICP utilizados para investigar la exactitud planimétrica de imágenes de alta resolución espacial es altamente variable, aunque puede generalizarse en 20 a 40 (Aguilar *et al.*, 2008). Tanto el FGDC como Kapnias *et al.* (2008) establecen un mínimo de 20 ICP. Sin embargo, la confiabilidad en la estimación de la exactitud planimétrica (RMSE) se incrementa con el número

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

de ICP. Aguilar *et al.* (2008) proponen un modelo no paramétrico para calcular la confiabilidad en la estimación. Los autores lo denominan modelo UAL (Universidad de Almería) y se presenta en el Apéndice 2. Utilizando este modelo es posible determinar si el tamaño de la muestra es suficiente para asegurar que el RMSE es menor a un valor de referencia. Esto se resuelve calculando el intervalo de confianza con un 95% de probabilidad (Ecuación 1).

$$\frac{1}{2} IC(RMSE_{1d})95\% = 1{,}96 \times RMSE_{1d} \times \frac{C(\%)}{100} \qquad [1]$$

siendo $RMSE_{1d}$: *root mean square error* de una dimensión (esto es, *x, y o z*; Apéndice 1, Ecuación 3 o Ecuación 8); $IC(RMSE_{1d})95\%$: intervalo de confianza del $RMSE_{1d}$ con un 95% de probabilidad; C(%): confiabilidad.

Sin embargo, esto no resuelve cuál debe ser la distribución espacial de los ICP. Kapnias *et al.* (2008) recomiendan un muestreo sistemático basado en una retícula. En cambio, el FGDC estipula (FGDC, 1998, Apéndice 3-C) que debido a la diversidad en los requerimientos de los usuarios de la geoinformación, ellos y/o los productores deben determinar la localización de los ICP. Para ello, provee las siguientes directrices: para validar geodatos que se creen con exactitud planimétrica uniforme, si estos cubriesen un área rectangular, los ICP deberían distribuirse para asegurar un espaciamiento entre puntos mayor a 10% de la diagonal de dicha área. Además, si el área se dividiera en cuadrantes, el cuadrante con menor densidad de ICP debería tener al menos un 20% del total. El FGDC también sugiere que los ICP pueden tener mayor densidad en áreas de interés y que, cuando la distribución del error no es uniforme, podría ser beneficioso colocar los ICP en concordancia con la distribución del error, para asegurar la representatividad de la muestra. En pocas palabras, la FGDC sugiere un diseño de muestreo dirigido, que es el habitualmente utilizado en investigaciones sobre la exactitud planimétrica de imágenes de alta resolución espacial (Kay *et al.*, 2003; Di *et al.*, 2003; Aguilar *et al.*, 2008; Junfeng y Jingfeng, 2006).

2.2. Distribución espacial del error en los modelos digitales de elevación (MDE)

En áreas montañosas, los errores del SRTM-C, SRTM-X y ASTER GDEM oscilan entre 5 y 23 m de $RMSE_z$ (Cuartero *et al.*, 2004; Hirano *et al.*, 2003; Hirt *et al.*, 2010; Ludwig y Schneider, 2006; METI, 2009). Los MDE generalmente son distribuidos en formato raster con una resolución espacial horizontal aproximadamente constante. Por lo tanto, la resolución espacial vertical será variable en función de la rugosidad del terreno (Hengl y Reuter, 2009, 89). Mientras menor sea la resolución espacial de un modelo, menor será la fidelidad con que representa la topografía y mayor será la diferencia absoluta con datos medidos en el terreno con el GPS (GPS-ICP). Por lo tanto, es probable que el error en los MDE, calculado según los estándares de la FGDC (Apéndice 1), esté asociado a la rugosidad del terreno. Además, existen otras razones para justificar la asociación entre geoformas y error vertical, como el error posicional (Niel *et al.*, 2008), la función de distribución de la reflectividad bidireccional (BRDF por sus siglas en inglés) en imágenes ópticas (Eckert *et al.*, 2005; Toutin, 2008) y la sombra de radar (Ludwig y Schneider, 2006; Toutin, 2002).

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

El error en los MDE suele estar espacialmente autocorrelacionado (Hengl y Reuter, 2009, 124), lo que se debe a la forma en que los MDE son generados y editados. Existen tres tipos de error en los MDE: a) errores groseros, b) errores sistemáticos, c) errores aleatorios o ruido (Hengl y Reuter, 2009, 91). Los primeros afectan un área específica del MDE y pueden ser detectados visualmente (METI, 2009). Los errores sistemáticos son aquellos asociados con la generación de los datos o del MDE. Por ejemplo, ocurren en las áreas afectadas por la sombra de radar (Ludwig y Schneider, 2006). Este tipo de error puede ser o no detectable visualmente. Los errores aleatorios suelen producirse por ruido en la señal y son muy comunes en MDE generados con datos satelitales (Hengl y Reuter, 2009, 93). En general, se los percibe como un patrón textural constante sobre el MDE.

Dentro de los errores sistemáticos se debe incluir al error posicional, que se refiere a si las geoformas, como por ejemplo las cimas de las montañas, se encuentran o no desplazadas con respecto a su posición real (Hengl y Reuter, 2009, 96). Detectar este error es complejo, pero es muy probable que esté presente en los MDE disponibles sin costo porque en ellos se calcula su geoposición sólo a través de las efemérides del satélite. Cómo se manifieste este error depende del tipo de topografía. En términos generales, afectará en mayor medida a las exposiciones perpendiculares al vector medio de desplazamiento (Niel *et al.*, 2008).

2.3. Propagación del error de los MDE a las ortoimágenes

La propagación del error desde los MDE a las ortoimágenes se ha corroborado experimentalmente (Junfeng y Jingfeng, 2006; Aguilar *et al.*, 2007). Desde el punto de vista de la propagación de errores aleatorios, el error en la ortoimagen puede expresarse como la suma del error en la etapa de ajuste del modelo de ortorrectificación más el error debido al MDE [Ecuación 2, Aguilar *et al.* (2007)], siempre que los errores sean independientes y el error medio no difiera significativamente de cero.

$$RMSE_{imag} = RMSE_{\mathrm{mod}} + RMSE_{*MDE} \qquad [2]$$

siendo RMSE: *root mean square error*, *imag*: referido al error planimétrico en la ortoimagen, *mod*: referido al error en el ajuste del modelo de ortorrectificación, **MDE*: referido al error producido por el MDE en la planimetría de la ortoimagen.

Para calcular el $RMSE_{*MDE}$ se debe conocer cómo el modelo de ortorrectificación propaga el error de los MDE a las ortoimágenes. Para el caso del M3D-CCRS puede utilizarse un sistema de curvas (Toutin, 1995) que predice el error planimétricos ($RMSE_{*MDE}$) ocasionado por el error en los MDE ($RMSE_z$), cuando éstos son utilizados para ortorrectificar datos adquiridos con un determinado ángulo de observación fuera del nadir (Apéndice 3).

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

2.4. Hipótesis

En terreno montañoso, la distribución de los errores planimétricos de ortoimágenes no es uniforme debido a la propagación, durante la corrección geométrica, del patrón de error desde el MDE a la ortoimagen.

3. Materiales y métodos

3.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica en el SO de la provincia de Río Negro (41º 57´ S y 71º 31´ O), en la región andino patagónica argentina, caracterizada por cordones montañosos y cerros modelados por procesos glaciares (figura 1). Ocupa una superficie de 100 km^2 con altitud muy variable entre 240 y 2200 m snm. Dentro del área se encuentran dos ríos permanentes con sentido de escurrimiento N-S: al oeste el Río Azul y en el centro el Quemquemtreu. Las máximas elevaciones se encuentran en el Cerro Pilquitritrón del sector este. La mayor parte de la superficie está ocupada por bosques puros y mixtos del genero *Nothofagus* y ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Serm. et Bizarri). En el valle del río Quemquemtreu se emplaza la ciudad de El Bolsón, con aproximadamente 30.000 habitantes. El norte del valle está cubierto en gran parte por cultivos de frutas finas.

3.2. Geodatos: datos satelitales, MDE y mediciones GPS

Se utilizaron datos pancromáticos ópticos del satélite QuickBird, producto "*Panchromatic OrthoReady*" (450 a 900 nm) con una resolución espacial nominal de 0,6 metros. Fueron capturados bajo programación el 03/10/2009, con azimut 86,7º e inclinación del sensor de 8,7º (8,4º perpendicular a la órbita).

Los MDE utilizados fueron el SRTM-C, del sitio web del Consorcio en Información espacial (http://srtm.csi.cgiar.org); el SRTM-X, del sitio web del Centro Aeroespacial Alemán (http://www.dlr.de/eo/en/DesktopDefault.aspx/tabid-5719/10058_read-30856); y el ASTER GDEM del sitio oficial del proyecto (http://www.ersdac.or.jp/GDEM/E/index.html).

Los GCP e ICP fueron medidos usando el método estático rápido con los equipos Trimble GeoXT y 4600SL, realizándose un postprocesamiento para su corrección diferencial en fase (Trimble, 2001). Se muestrearon 9 GCP distribuidos según lo recomendado para el M3D-CCRS (Toutin, 2004). Se situó un GCP en el sector de mínimas y otro en el de máxima alturas. Los 7 restantes se seleccionaron considerando una distribución uniforme en los bordes de la imagen.

En áreas montañosas rurales, el muestreo de los ICP es condicionado por varios factores. Los más importantes son: a) costosa accesibilidad a zonas de alta montaña, b) baja frecuencia espacial de objetos identificables con precisión, c) interferencia de la señal del GPS por el dosel

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

forestal y las montañas. Estas dificultades fueron consideradas para realizar un muestreo dirigido de 20 ICP, de los cuales uno no pudo corregirse diferencialmente a causa de un error de sincronización. Por esta razón se dispuso de 19 ICP para realizar la evaluación de exactitud planimétrica, valor que se encuentra muy próximo al mínimo recomendado. Con respecto a la localización de los ICP, en la figura 2 puede evaluarse la distribución espacial.

3.3. Preprocesamiento y análisis

En el diagrama de flujo (figura 3) se establece la relación entre los procedimientos y análisis realizados, los cuales se desarrollan bajo los subtítulos de este mismo apartado. Las letras de la figura hacen referencia a los mencionados subtítulos.

A) Corrección geométrica

Se realizaron tres ortorrectificaciones de la imagen satelital QuickBird, una por cada MDE evaluado. En los tres casos se utilizó la convolución cúbica como algoritmo de remuestreo y los 9 GCP medidos, lo cual es una cantidad adecuada para ajustar el M3D-CCRS del software Geomatica PCI V10.1.3 (Toutin y Chénier, 2004). Todos los procedimientos fueron realizados en el sistema de coordenadas Gauss-Krüger faja 1 con datum y elipsoide WGS84 (se denominó *x* al eje en sentido oeste-este para facilitar la comparación con sistemas internacionales). Antes de realizar la ortorrectificación, los tres MDE fueron reproyectados al sistema Gauss-Krüger mencionado, utilizando convolución cúbica como algoritmo de remuestreo. Para que todas las alturas se refieran al geoide, se cambió la altura de referencias del SRTM-X desde el elipsoide al geoide (software Geomatica PCI V10.1.3).

B) Estimación del error en los modelos digitales de elevación (MDE)

Para estimar la exactitud de los MDE, se calculó el error vertical con 28 ICP (los GCP utilizados para la ortorrectificación son independientes con respecto a los MDE). El error fue calculado según los estándares de la FGDC (Apéndice 1).

C) Comparación entre ortorrectificaciones

Para comparar las ortorrectificaciones entre sí fue digitalizado en pantalla (escala 1:100) un vector de divergencia entre un punto identificado en la imagen de referencia y el mismo punto en la imagen a comparar. Para establecer los puntos donde se trazaría el vector se superpuso una malla con celdas de 750 m y con círculos de 25 m de radio en el centro de cada celda. En cada uno de los círculos se trazó el vector de divergencia en el punto identificable con mayor claridad. Con esta metodología se digitalizaron 182 vectores. Con la longitud de los vectores de divergencia asignada como atributo a los círculos de 25 m de radio se realizó una transformación de vector a formato raster mediante una red de triángulos irregulares (TIN, software Geomatica PCI V10.1.3). Se

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

promediaron los tres raster para zonificar la superficie en función de las variaciones en posición relativa.

D) Estimación de exactitud planimétrica en las ortoimágenes

Para estimar la exactitud planimétrica fueron utilizados los estándares de la FGDC (Apéndice 1). Además, fue calculado el modelo UAL (Apéndice 2) para estimar el intervalo de confianza del RMSE. Se realizó un análisis de la varianza (ANOVA por sus siglas en inglés) con los errores en el ajuste del modelo y en las ortoimágenes, la variable de interés fue $error_x$ y $error_y$, siendo la fuente de variación el origen de la altura utilizada en los ICP (GPS, SRTM-C, AGDEM o SRTM-X). Los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los residuos fueron corroborados.

4. Resultados

4.1. Estimación del error en los MDE.

Los errores en altitud del modelo SRTM-X tuvieron menor dispersión que los del AGDEM y SRTM-C (figura 4). En el SRTM-C, la distribución tuvo una asimetría con sesgo hacia los valores positivos. Sólo en el caso del SRTM-X y AGDEM los errores se distribuyeron normalmente (tabla 1). El $RMSE_z$ del SRTM-X fue notablemente inferior al del SRTM-C y AGDEM. En SRTM-X y AGDEM, la prueba de t demostró falta de sesgo; mientras que la prueba de F confirmó que el desvío estándar de los errores verticales del AGDEM fue mayor que el del SRTM-X. Por otro lado, el error lineal (EL) con una probabilidad de 95 % acorta la diferencia en exactitud entre el AGDEM y el SRTM-X.

4.2. Comparación entre ortorrectificaciones

La magnitud de la divergencia entre ortorrectificaciones fue similar en las tres comparaciones; también en los tres casos fue mayor la divergencia en el eje *x* en comparación con el eje *y* (tabla 2). Algunos valores extremos se agruparon en el espacio formando un patrón claramente identificable (figura 5). Este patrón está asociado a las características de la topografía. En terrenos relativamente llanos la divergencia es menor que en terreno escarpado. Para confirmar esta observación fueron compiladas las tres ortoimágenes y se le asignó a cada una de ellas un canal RGB. De esa manera, los colores revelaron mayor diferencia en terreno escarpado (figura 6). Sin embargo, algunos vectores de gran magnitud no se asocian a terrenos escarpados, como sucede en un sector no escarpado de la comparación SRTM-X y AGDEM (figura 5), donde puede verse el inicio del vector de divergencia más largo (aproximadamente 20 m), el cual indica la posición del error grosero encontrado en la imagen ortorrectificada con SRTM-X (figura 7).

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

4.3. Exactitud planimétrica

Los errores estimados en el eje *x* fueron mayores a los del eje *y* (tabla 3). La prueba de t demostró que existe sesgo en el eje *x* pero no en el eje *y*. El ANOVA indicó que no existen diferencias significativas en la exactitud planimétrica de las ortoimágenes generadas con distinto MDE, tanto en *x* (p=0,25857) como en *y* (p=0,99541). El análisis visual de la figura 8 ratifica ese resultado, ya que la magnitud y dirección de los vectores es similar en los tres casos. Sin embargo, es necesario reparar en el extremo suroeste del área, en donde puede verse un grupo de vectores con marcadas diferencias en magnitud. En esa área, el AGDEM (figura 8.A) tiene vectores menores que el SRTM-X y SRTM-C (figura 8.B y figura 8.C). Probablemente sea ese grupo de vectores los que marquen la diferencia en el $RMSE_x$ de la figura 9.

En el párrafo anterior fueron resumidos los resultados de varias alternativas para evaluar exactitud planimétrica. Puede observarse cierta inconsistencia entre la estadística paramétrica y el RMSE. Si solamente se hubiese analizado el RMSE se llegaría a la conclusión de que la ortorrectificación debe ser realizada con AGDEM. Sin embargo, esto es teóricamente inverosímil, ya que el $RMSE_x$ de la validación del ajuste del modelo es mayor que el $RMSE_x$ de la ortorrectificación con el AGDEM. Esto sugiere la necesidad de tomar muestras más grandes para obtener estadísticos más robustos.

Por otro lado, como fue mencionado en 3.2, para realizar el muestreo de los ICP se consideraron los factores accesibilidad a zonas de alta montaña, frecuencia espacial de objetos identificables con precisión e interferencia de la señal del GPS por el dosel forestal y las montañas. Si se hubiese considerado la diferencia en altitud entre los MDE, entonces, algunos de los puntos hubiesen sido medidos en las zonas rojizas de la figura 8. Sin embargo, debido a que estas superficies son reducidas, no fueron favorecidas por el azar y ningún ICP fue medido allí. Por esa razón, con la muestra de ICP es imposible detectar diferencias en la exactitud planimétrica de las ortoimágenes, aunque es evidente que existe una diferencia. Esto demuestra que, a la hora de realizar el diseño de muestreo, es importante evaluar la distribución espacial esperable en los errores planimétricos de la ortoimagen.

5. Discusión

Se resume en la tabla 4 los antecedentes en estimación del error vertical de MDE, siendo similares en rango a los calculados en este trabajo (tabla 1), aunque no se corresponden modelo a modelo. Jacobsen (2004) ha encontrado que los datos SRTM-C poseen una alta exactitud dependiendo de la pendiente del terreno, el tipo de vegetación presente y de la posibilidad de corrección del desplazamiento planimétrico. En cuanto a la distribución espacial de los errores altimétricos, Ludwig y Schneider (2006) señalan un mayor error en terreno escarpado para SRTM-X; la comparación de los resultados de Cuartero *et al.* (2004) e Hirano *et al.* (2005) también señala mayor error en terreno escarpado, aunque estos autores trabajaron con un MDE derivado de una sola imagen ASTER. Hirt *et al.* (2010), a diferencia de lo reportado en la tabla 1, indican mayor exactitud del SRTM-C en comparación con el AGDEM, pero esto puede deberse al tipo de topografía de Australia, mayormente plana. En resumen, existen claras evidencias de que el error

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

está asociado a la rugosidad del terreno, pero aún no es claro cuál de los MDE disponible sin costo es más exacto. Según lo reportado en la tabla 1, el SRTM-X es el más exacto, lo cual se corresponde con el hecho de que los datos radar banda X tienen mayor resolución que los datos radar banda C. Sin embargo, el mayor $RMSE_z$ de la tabla 4 se corresponde con el SRTM-X y fue reportado por Ludwig y Schneider (2006). Esto podría deberse a errores groseros o errores sistemáticos, como el detectado en la figura 7, que podrían editarse con el consecuente cambio en el cálculo de exactitud.

Aguilar *et al.* (2007) realizaron ortorrectificaciones de datos pancrómaticos QuickBird (8º fuera del nadir) en un área con un desnivel de 800 m. Utilizaron el M3D-CCRS (9 GCP) con un ajuste de 0,45 m en $RMSE_x$ y 0,47 m en $RMSE_y$ (n=79 ICP). En el presente trabajo, el ajuste logrado para el modelo fue de 1,88 ± 0,5 m en $RMSE_x$ y 1 ± 0,3 m en $RMSE_y$ (figura 9), con sesgo significativo en *x*. Fraser y Hanley (2005) hallan los mayores errores en *y* (a lo largo de la órbita) para QuickBird e IKONOS, atribuyéndolo a perturbaciones en la velocidad de escaneo. En el presente trabajo esto se invierte, con los mayores errores en la dirección perpendicular a la órbita. Esto podría explicarse por la diferencia entre el ángulo de inclinación a lo largo de la órbita (*in-track*) y el perpendicular a ella (*cross-track*), siendo el primero de sólo 2º y el segundo de 8,4º. Como los errores de elevación, tanto de los GCP cómo de los MDE, se propagarán en el sentido del mayor ángulo de inclinación del sensor (véase 2.3), puede explicarse la dirección predominante de los vectores observada en la figura 5 y figura 8. Además, en el caso particular estudiado en el presente trabajo, la dirección del mayor ángulo de inclinación del sensor coincide con el perfil del valle (figura 1), incrementando, probablemente, el efecto mencionado.

Si se analiza conjuntamente la figura 5 y figura 8 (nótese que en ambos casos los vectores fueron escalados 250 veces), es evidente que la magnitud de los errores es menor que la magnitud de las divergencias. Dicha observación no resulta consistente ya que la lógica sugiere que si existen diferencias planimétricas entre ortoimágenes es esperable que su exactitud planimétrica sea diferente. Si las figuras se estudian con mayor detalle se puede observar que los vectores de error se encuentran en las zonas en que los vectores de divergencia tienen menor magnitud. Este mismo análisis puede realizarse usando solo la figura 8, ya que los verdes indican divergencia promedio baja y los rojos divergencia promedio alta. Por lo tanto, si bien en ciertas zonas de la imagen la exactitud planimétrica debería ser muy diferente, en el área que fue realizado el muestreo de ICP la exactitud planimétrica debería ser muy similar, de acuerdo con lo observado.

Los intervalos de confianza de la estimación de exactitud planimétrica (figura 9) indican que, con la intensidad de muestreo de 19 ICP, sólo es posible detectar diferencias de error planimétrico mayores a un metro. Por lo tanto, si la diferencia es menor a un metro es lógico que no haya sido detectada en los análisis realizados. Con las curvas presentadas por Toutin (1995) del M3D-CCRS (véase 2.3) se obtuvo el error planimétrico teórico esperado[1], el cual fue menor a un metro cuando se ortorrectificó con SRTM-X, un metro cuando se empleó el AGDEM y dos metros con el SRTM-C. Por lo tanto, la diferencia fue menor o igual a un metro y no podría haberse detectado con la intensidad de muestreo de 19 ICP.

Aguilar *et al.* (2007) pusieron a prueba tres MDE de 20, 10 y 5 m de resolución espacial con $RMSE_z$ de 5,82; 1,75 y 0,31 m (50 ICP-DGPS), respectivamente. Calcularon la exactitud

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

planimétrica con 79 ICP y obtuvieron un $RMSE_r$ de 1,3; 0,78 y 0,71 m, respectivamente. En ese caso, la diferencia de exactitud esperada fue menor a un metro, pero pudo ser detectada debido a la alta intensidad de muestreo. Junfeng y Jingfeng (2006) generaron dos MDE de 5 y 25 m de resolución espacial a partir de mapas topográficos (escala 1:10000 y 1:50000, respectivamente). Con los MDE ortorrectificaron una imagen IKONOS de una isla con relieve moderadamente montañoso. Utilizaron 33 GCP y evaluaron el error planimétrico con 25 ICP. Obtuvieron un RMSE de 1,5 m para el primer caso y de 2,6 m para el segundo, verificando la propagación del error desde el MDE a las ortoimágenes a pesar de que la intensidad de muestreo no fue tan alta como la de Aguilar *et al.* (2007).

Como fue mencionado en párrafos anteriores, los errores de elevación se propagarán en el sentido del mayor ángulo de inclinación del sensor. Si se consulta a las curvas del Apéndice 3, pero en vez de usar el ángulo de inclinación de 8,7º se utiliza el ángulo a lo largo de la órbita de 2º, el error planimétrico esperado, incluso para SRTM-C, es menor a un metro. Por lo tanto, en la ortorrectificación de imágenes QuickBird nadir la exactitud de los MDE tiene un rol poco relevante, por lo que podría utilizarse MDE de moderada resolución espacial y obtener errores planimétricos menores a 1 m, siempre y cuando el ajuste del modelo sea del orden de 0,5 m. Siguiendo un razonamiento similar, es más importante la exactitud altimétrica de los GCP en la ortorrectificación de imágenes con geometría de observación fuera del nadir que en imágenes nadir.

Los resultados obtenidos en este trabajo y los determinados por Aguilar *et al.* (2007) y Junfeng y Jingfeng (2006) confirman empíricamente la relación entre errores planimétricos en ortoimágenes y errores verticales en MDE. Además, los resultados de este trabajo muestran que el error se manifiesta relacionado a la inclinación del sensor y a la forma del relieve. El error en los MDE, el cual está asociado con el relieve escarpado, se propagará a la ortoimagen con mayor intensidad en las áreas con pronunciada diferencia en altitud, generando un vector de error con dirección aproximadamente coincidente con la línea de vista del sensor, conclusión que apoya la hipótesis de este trabajo.

6. Conclusión

Los errores en los MDE se encuentran espacialmente asociados con la rugosidad del relieve. El SRTM-X es más exacto que el AGDEM y SRTM-C. Sin embargo, esto puede no verificarse debido a la existencia de errores groseros y errores sistemáticos. Este tipo de errores puede ser editado, para lo que es de utilidad la información auxiliar anexa al producto. El error en los MDE se propagará a la ortoimagen con mayor intensidad en las mayores y menores elevaciones del área, generando un vector de error con dirección aproximadamente coincidente con la línea de vista del sensor. En la ortorrectificación de imágenes QuickBird nadir la exactitud de los MDE tiene un rol poco relevante, por lo que podría utilizarse MDE de moderada resolución espacial y obtener errores planimétricos menores a 1 m, siempre y cuando el ajuste del modelo sea del orden de 0,5 m. Para lograr un buen ajuste del modelo es más importante la exactitud altimétrica de los GCP en imágenes con geometría de observación fuera del nadir que en imágenes nadir. Esto se debe a que el error vertical, tanto del GPS como de los MDE, se traduce en mayores desplazamientos horizontales en la medida que el ángulo de inclinación del sensor aumenta.

© Los autores
www.geo-focus.org

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica Orientada "Evaluación y Monitoreo de los Bosques Andino Patagónicos utilizando Técnicas de Percepción Remota Multisensor" (PICTO 36812), financiado por el Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT) y cofinanciadores provinciales y nacionales de la Argentina. Se agradece a los revisores anónimos sus valiosos comentarios.

Referencias bibliográficas

Aguilar, M., Agüera, F., Aguilar, F. y Carvajal, F. (2008): "Geometric accuracy assessment of the orthorectification process from very high resolution satellite imagery for Common Agricultural Policy purposes", *International Journal of Remote Sensing*, 29, 24, 7181-7197.

Aguilar, M., Aguilar, F., Agüera, F. y Sánchez, J. (2007): "Geometric accuracy assessment of Quickbird basic imagery using different operational approaches", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73, 12, 1321-1332.

Aguilar, M. A., Aguilar, F. y Agüera, F. (2008): "Assessing geometric reliability of corrected images from very high resolution satellites", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 74, 12, 1551-1560.

Corbelle-Rico, E., Gil-Docampo, M., Armesto-González, J. y Rego-Sanmartín, T. (2006): "La escala cartográfica de la imagen de satélite. Caso particular de las imágenes Ikonos y QuickBird", *Revista de Teledetección*, 26, 18-24.

Cuartero, A. y Felicísimo, A. (2003): "Rectificación y ortorrectificación de imágenes de satélite: análisis comparativo y discusión", *Geofocus*, 3, 1, 45-58.

Di, K., Ma, R. y Li, R. (2003): "Rational functions and potential for rigorous sensor model recovery", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 1, 33-41.

Eckert, S., Kellenberger, T. y Itten, K. (2005): "Accuracy assessment of automatically derived digital elevation models from ASTER data in mountainous terrain", *International Journal of Remote Sensing*, 26, 9, 1943-1957.

FGDC (1998): *Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*. Comité Federal de Datos Geográficos de EEUU. [Consulta: 13-07-2011]. Disponible en http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3

Foody, G. y Atkinson, P. (2002): *Uncertainty in Remote Sensing and GIS*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England, Wiley

Fraser, C. S. y Hanley, H. B. (2005): "Bias-compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71, 8, 909-915.

Greenwalt, C. R. y Schultz, M. E. (1962): *Principles of error theory and cartographic aplications*. Comité Federal de Datos Geográficos de EEUU. [Consulta: 13-07-2011]. Disponible en http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/tr96

Hengl, T. y Reuter, H. (2009): *Geomorphometry. Concepts, software, applications*. Amsterdam, Elsevier.

© Los autores
www.geo-focus.org

Hirt, C., Filmer, M. y Featherstone, W. (2010): "Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia", *Australian Journal of Earth Sciences*, 57, 3, 337-347.

Itten, K. I., Meyer, P., Kellenberger, T., Leu, R., Sandmeier, S., Bitter, P., Seidel, K. (1992): "Correction of the impact of topography and atmosphere on Landsat-TM forest mapping of Alpine Regions", *Remote Sensing Series*, 18, 48.

Jensen, J. (2000): *Remote sensing of the environment an Earth resource perspective*. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice-Hall.

Jacobsen, K. (2004): *Analysis of digital elevation models based on space information*. EARSEL Symposium, Dubrovnik. [Consulta: 25-11-2011]. Disponible en http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/JAC_dubrov04.pdf

Junfeng, X. y Jingfeng, H. (2006): "Orthorectification of IKONOS and impact of different resolution DEM", *Geo-spatial Information Science*, 9, 2, 108-111.

Kapnias, D., Milenov, P. y Kay, S. (2008): *Guidelines for best practice and quality checking of ortho imagery* (p. 45). Italy, Joint Research Centre. [Consulta: 13-07-2011]. Disponible en http://mars.jrc.it/mars/content/download/1231/7140/file/Orthoguidelines_v3_final.pdf

Kay, B., Spruyt, P. y Alexandrou, K. (2003): "Geometric Quality Assessment of Orthorectified VHR Space Image Data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 5, 481-491.

Lencinas, J. D. (2009): "Bosques de montaña y teledetección óptica espacial: Desarrollo y perspectivas", *Congreso Forestal Mundial", XIIIº Congreso Forestal Mundial*, Buenos Aires. CD-ROM, 13 páginas.

Ludwig, R. y Schneider, P. (2006): "Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60, 5, 339-358.

METI. (2009): *ASTER Global DEM Validation*. Ministry of Economy, Trade and Industry de Japón and NASA [Consulta:13-07-2011]. Disponible en http://www.ersdac.or.jp/GDEM/E/image/ASTERGDEM_ValidationSummaryReport_Ver1.pdf

Niel, T., Mcvicar, T., Li, L., Gallant, J. y Yang, Q. (2008): "The impact of misregistration on SRTM and DEM image differences", *Remote Sensing of Environment*, 112, 2430-2442.

Rabus, B., Eineder, M., Roth, A. y Bamler, R. (2003): "The shuttle radar topography mission-a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 4, 241-262.

Rocchini, D. y Di-Rita, A. (2005): "Relief effects on aerial photos geometric correction", *Applied Geography*, 25, 2, 159-168.

Rodríguez, E., Morris, C. y Belz, J. (2006): "A Global Assessment of the SRTM Performance", *Photogrammetric Engineering* y *Remote Sensing*, 72, 3, 249-260.

Steel, R. y Torrie, J. (1993): *Bioestadística: principios* y *procedimientos. México*, McGraw-Hill.

Sáchez-Martín, N. y Pérez-Gutiérrez, C. (2005): "Control geométrico de imágenes QuickBird para fines cartográficos". [Consulta: 13-07-2011]. Disponible en http://www.isprs.org/publications/related/semana_geomatica05/front/abstracts/Dimecres9/R26.pdf

Toutin, T. (1995): "Multi-source data fusion with an integrated and unified geometric modeling", *EARSeL Advances in Remote Sensing*, 4, 2, 118-129.

Toutin, T. (2002): "Impact of terrain slope and aspect on radargrammetric DEM accuracy", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 3, 228.

© Los autores
www.geo-focus.org

Toutin, T. (2004): "Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods", *International Journal of Remote Sensing*, 25, 10, 1893-1924.

Toutin, T. (2008): "ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: a review", *International Journal of Remote Sensing*, 29, 7, 1855-1875.

Toutin, T. y Chénier, R. (2004): *GCP requirement for high-resolution satellite mapping*. Estambul, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.[Consulta:13-07-2011]. Disponible en http://www.cartesia.org/geodoc/isprs2004/comm3/papers/385.pdf

Toutin, T., Chénier, R. y Carbonneau, Y. (2002): "3D Models for High Resolution Images: Examples with Quickbird, IKONOS, and EROS", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 547-551.

Trimble. (2001): *Trimble Survey Controller: Reference Manual*. Trimble. [Consulta:13-07-2011]. Disponible en http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-7965/RefMan.pdf

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

TABLAS

Tabla 1. Estadísticos del error vertical en los MDE (error$_z$) calculado con 28 ICP

MDE	$RMSE_z$ (m)	Media (m)	S (m)	EL(95%) (m)	Valor de p SH-W	t	F
SRTM-X	4,30	0,38	4,36	4,06	ns	ns	***
AGDEM	9,83	1,31	10,1	6.14			
SRTM-C	10,02	-	-	-	**	-	-

S: desvío estándar; EL(95%): error lineal con una probabilidad de 95 %; SH-W: prueba de normalidad de Shapiro Wilk (H_0: distribuidos normalmente, α=0,5); t: prueba de t (H_0: μ=0, α=0,5); F: prueba de F de igualdad de varianzas (H_0: $\sigma^2_1=\sigma^2_2$, α=0,5); **: P < 0,01; ***: P < 0,001; ns: no significativo.

Tabla 2. Divergencia entre ortorrectificaciones (n=182)

Divergencia entre		RMSE (m)	Mediana (m)	Rango intercuartil (m)	Valor de p SH-W
O/SRTM-X y O/AGDEM	x	2,50	0,53	1,81	***
	y	0,42	0,00	0,09	
	r	2,53	1,14	1,19	-
O/SRTM-X y O/SRTM-C	x	2,97	0,17	1,88	***
	y	0,34	0,00	0,10	
	r	2,99	0,87	1,46	-
O/SRTM-C y O/AGDEM	x	3,08	0,05	2,28	***
	y	0,35	0,00	0,16	
	r	3,10	1,16	1,53	-

O/*i*: ortorrectificación con el MDE *i*; SH-W: prueba de normalidad de Shapiro Wilk (H_0: distribuidos normalmente, α=0,5); ***: p < 0,001.

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

Tabla 3. Estimación de exactitud planimétrica (n=19 ICP)

			EM (m)	S (m)	valor de p SH-W	t
Ajuste del modelo	Altura GPS	x	1,42	1,18	ns	***
		y	0,24	0,96		ns
Ortorrectificación con:	SRTM-X	x	1,17	1,22	ns	***
		y	0,21	0,97		ns
	AGDEM	x	0,64	1,13	ns	*
		y	0,16	1,00		ns
	SRTM-C	x	1,34	1,62	ns	**
		y	0,23	1,00		ns

EM: Error Medio; S: Desvío Estándar; SH-W: prueba de normalidad de Shapiro Wilk (H_0: distribuidos normalmente, α=0,5); t = prueba de t (H_0: EM=0, α=0,5); *: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$; ns: no significativo.

Tabla 4. Antecedentes sobre estimación de error vertical ($RMSE_z$) en MDE

Referencia	MDE	n	$RMSE_z$ (m)	S	Escala	Rango de elevación (m)
Cuartero *et al.* (2004)	ASTER	315	12,6	12,5	regional	2500
Hirano *et al.* (2003)	ASTER	39	7,3	-	regional	320
Hirt *et al.* (2010)	AGDEM	911	13,1	10,2	continente australiano	2000
	SRTM-C		5	4,9		
Jacobsen (2004)	SRTM-C	-	13,8	-	regional	-
Ludwig y Schneider (2006)	SRTM-X	31	23,0	21.35	regional	1000
		30	9,85	-	regional	160
METI (2009)	AGDEM	287	8,58	-	Japón	>3000

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

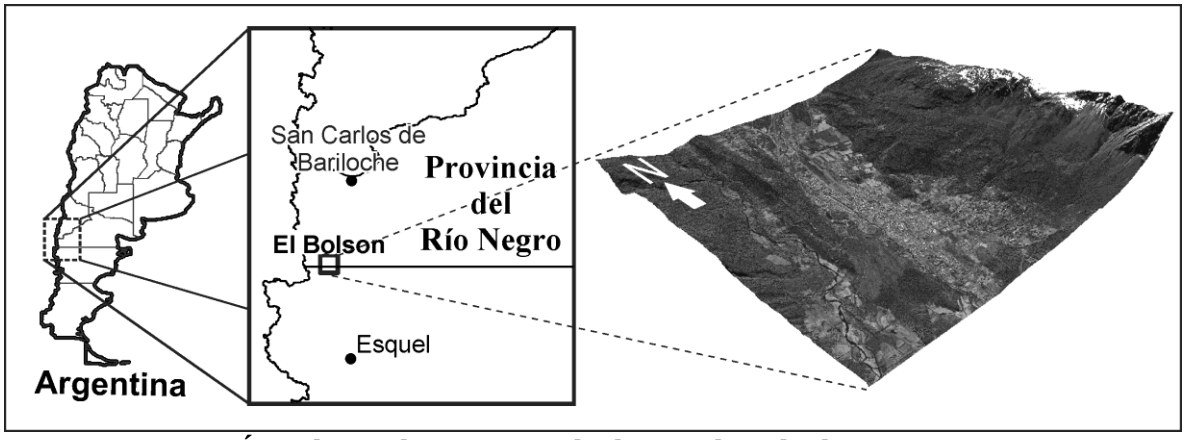


Figura 1. Área de estudio. Datos satelitales QuickBird sobre MDE SRTM-X.

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

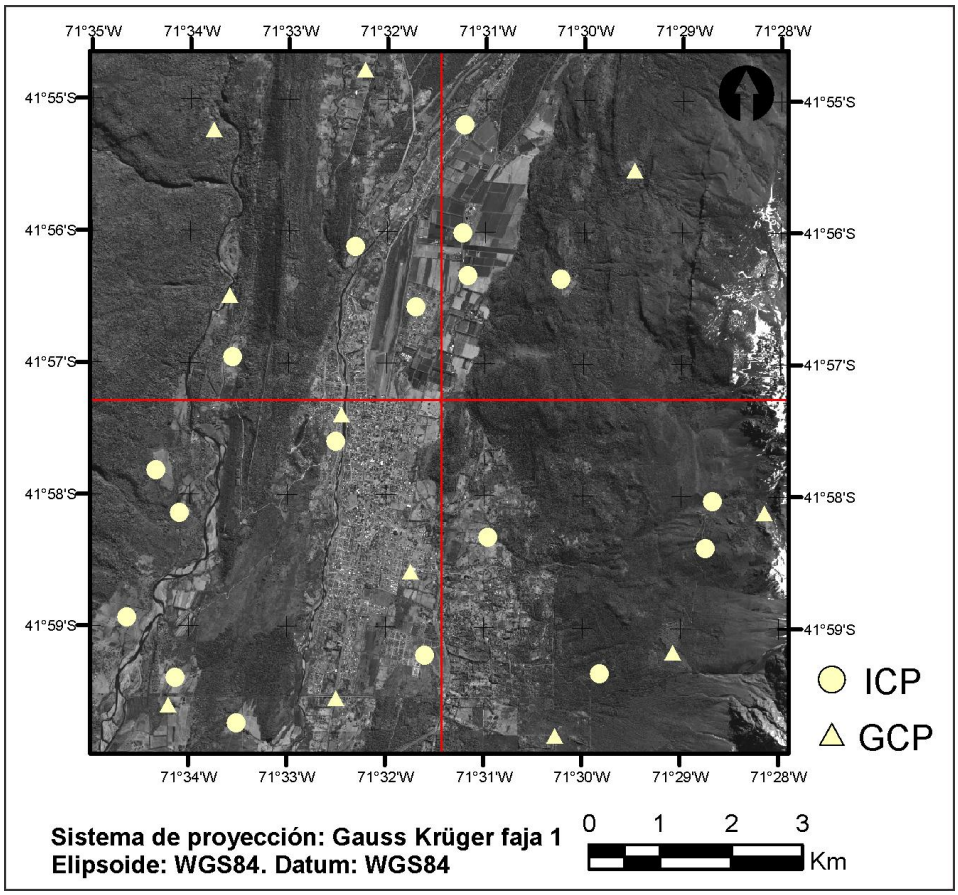


Figura 2. Distribución espacial de los 19 ICP y 9 GCP.

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

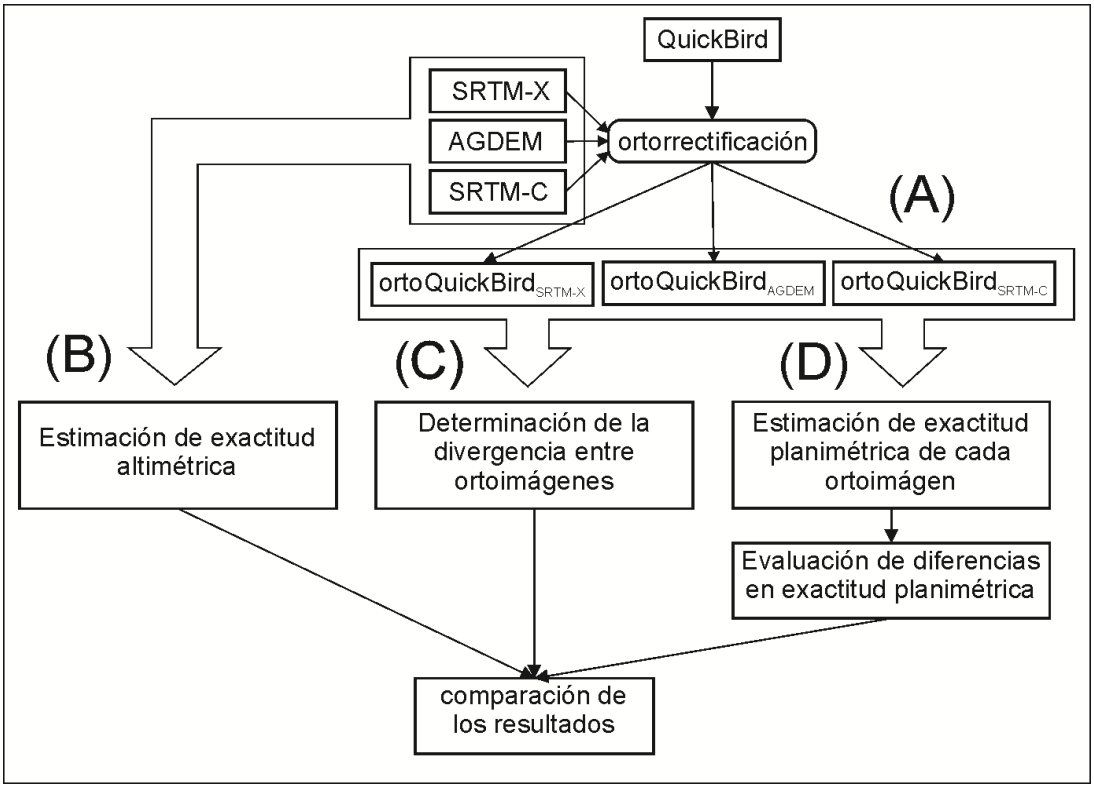


Figura 3. Diagrama de flujo del trabajo.

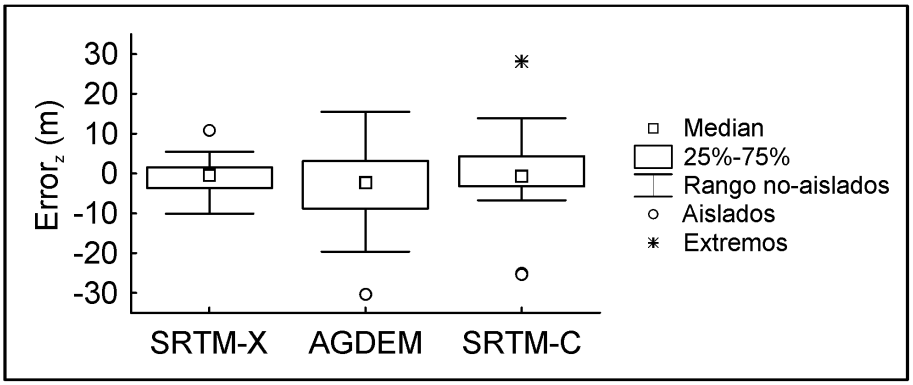


Figura 4. Distribución de errores verticales (error$_z$) en los MDE (n = 28 ICP). Valores aislados son los alejados de la mediana 1,5 veces el rango intercuartil, los valores extremos son los alejados tres veces.

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

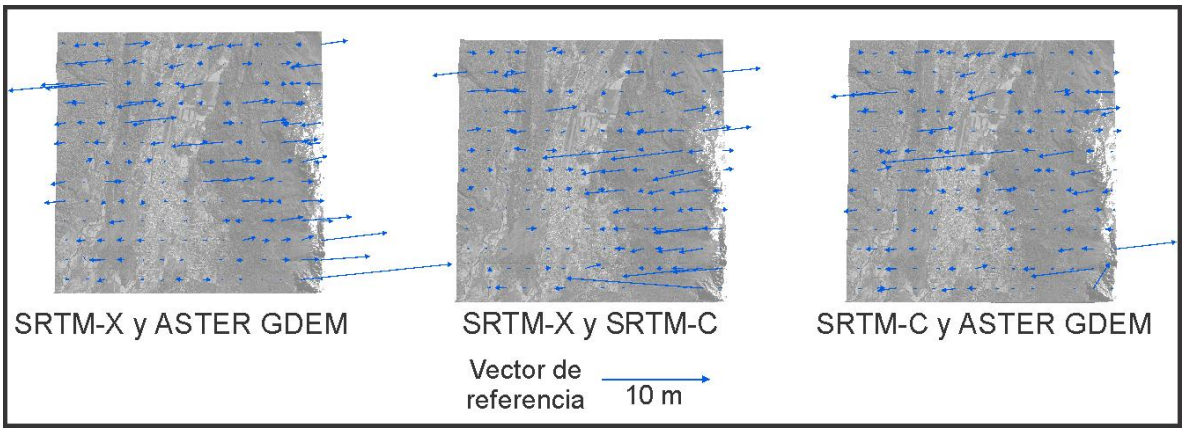


Figura 5. Divergencia entre ortorrectificaciones con distinto MDE. Vectores incrementados 250 veces sobre imagen QuickBird (10 x 10 km).

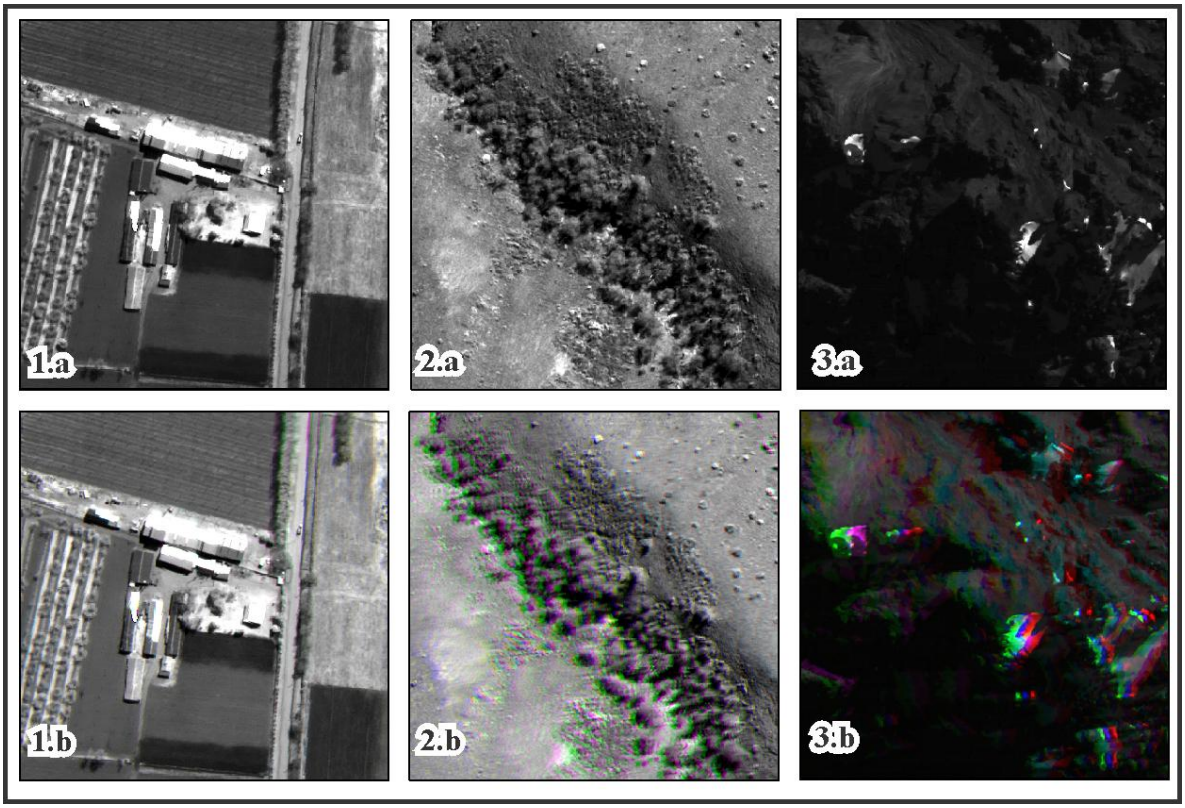


Figura 6. Recortes de imagen QuickBird de 250 x 250 metros. Fila a, ortorrectificación con SRTM-X. Fila b, combinación en diferentes canales (RGB) de ortorrectificación con SRTM-X, SRTM-C y AGDEM. Columna 1, zona urbano-rural; 2, bosque en ladera; y 3, zona de alta montaña.

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

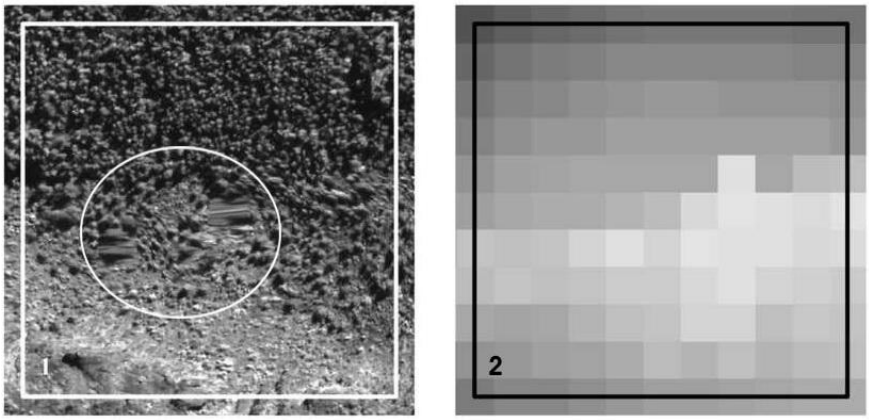


Figura 7. Errores groseros producidos en datos pancromáticos QuickBird ortorrectificados con SRTM-X. Los recortes representan un área de 300 x 300 metros; 1) ortorrectificación con SRTM-X; 2) imagen de estimación de calidad anexa al SRTM-X, los colores claros indican mayor error en los datos de elevación.

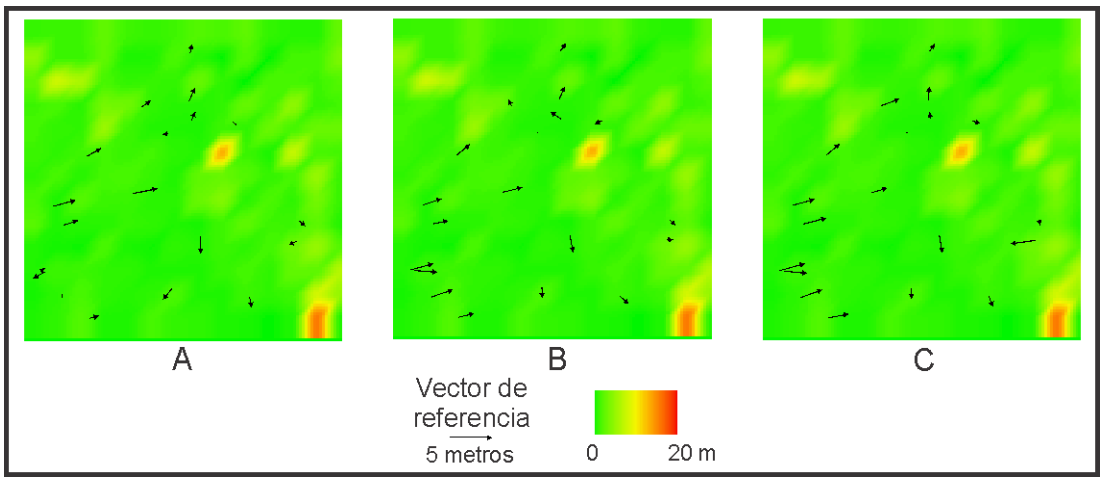


Figura 8. Vectores de error planimétrico incrementados 250 veces. Cada cuadrado representa el área de estudio. A) Ortorrectificación con AGDEM, B) con SRTM-X y C) con SRTM-C. En color, la divergencia promedio entre ortoimágenes generadas con distintos MDE.

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

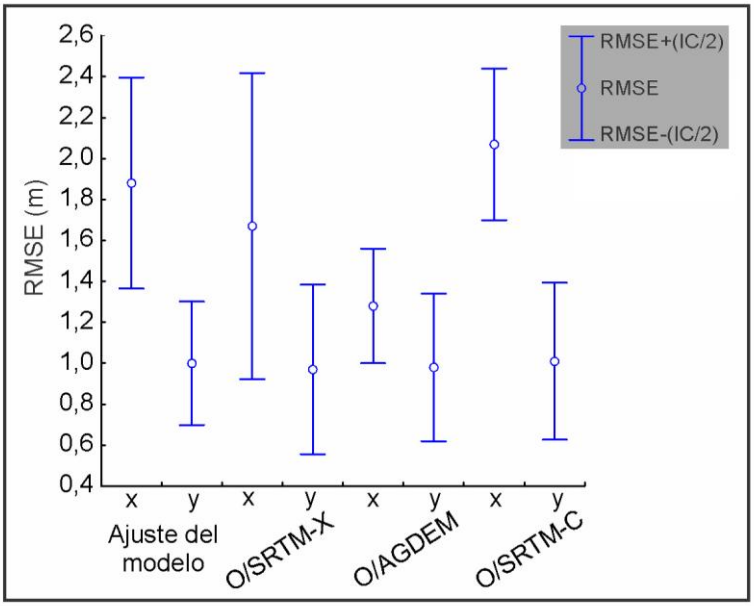


Figura 9. Intervalo de confianza (IC) con probabilidad de 95% del RMSE planimétrico (x, y). O/*i*: ortorrectificación con el MDE *i* (n=19 ICP).

APÉNDICE 1. Ecuaciones para calcular exactitud planimétrica y altimétrica

1. Exactitud planimétrica u horizontal

$$error_{x,i} = x_{orto-imagen,i} - x_{ICP,i} \; ; \; error_{y,i} = y_{orto-imagen,i} - y_{ICP,i} \qquad [1]$$

$$error_{r,i} = \sqrt{error_{x,i}^2 - error_{y,i}^2} \qquad [2]$$

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum error_{x,i}^2}{n}} \; ; \; RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum error_{y,i}^2}{n}} \qquad [3]$$

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{\sum error_{r,i}^2}{n}} \qquad [4]$$

siendo ICP = punto de control independiente, error = diferencia longitudinal en el plano entre el punto independiente de control identificado en la ortoimagen y su respectiva coordenada en el terreno, x = Referido al eje ortogonal en dirección oeste-este, y = Referido al eje ortogonal en

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

dirección sur-norte, r = Referido a la magnitud del vector de error, n = número de ICP, i = rango de números enteros entre 1 y n.

Si el error tiene distribución normal con media ≈ 0 y el $error_x$ es independiente del $error_y$, entonces puede calcularse el error circular con una probabilidad del 95% [EC(95%)].

1) Cuando $RMSE_x \approx RMSE_y$

$$EC(95\%) = 1{,}7398\sqrt{RMSE_r} \qquad [5]$$

2) Cuando $RMSE_x \neq RMSE_y$, siempre que el cociente entre el RMSE mínimo y máximo sea mayor a 0,6.

$$EC(95\%) = 1{,}2239\sqrt{RMSE_r} \qquad [6]$$

2. Exactitud altimétrica o vertical

$$error_{z,i} = z_{MDE,i} - z_{ICP,i} \qquad [7]$$

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum error_{z,i}^2}{n}} \qquad [8]$$

siendo MDE = modelo digital de elevación, ICP = punto de control independiente, error = diferencia vertical entre el MDE y el ICP para una coordenada geográfica, n = número de ICP, i = rango de números enteros entre 1 y n.

Si el error tiene distribución normal con media ≈ 0, entonces puede calcularse el error lineal con una probabilidad del 95% [EL(95%)].

$$EL(95\%) = 1{,}9600\sqrt{RMSE_z}$$
[9]

APÉNDICE 2. Modelo para el cálculo de confiabilidad en la estimación de exactitud planimétrica (modelo UAL)

$$C(\%) = \frac{100 \times S^2}{2\sqrt{n} \times \left(S^2 + \bar{e}^2\right)} \times \sqrt{\gamma_2 + 3 + \frac{4 \times \bar{e} \times \gamma_1}{S^2} + \frac{4 \times \bar{e}^2}{S^2} - 1} \qquad [1]$$

© Los autores
www.geo-focus.org

Lencinas, J. y Díaz, G. (Año): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

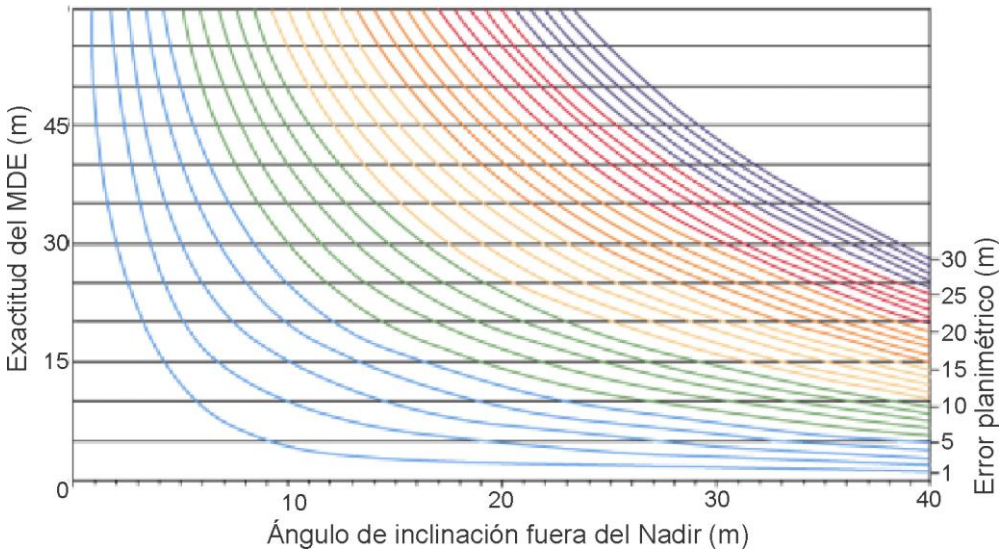
$$\gamma_1 = \frac{n}{(n-1)\times(n-2)\times S^3} \times \sum_{i=1}^{n} (e_i - \bar{e})^3$$

$$\gamma_2 = \left(\frac{n\times(n+1)}{(n-1)\times(n-2)\times(n-3)\times S^4} \times \sum_{i=1}^{n} (e_i - \bar{e})^4 \right) - \frac{3\times(n-1)^2}{(n-2)\times(n-3)} \qquad [2]$$

siendo C(%) = confiabilidad, $\bar{e}$ = error medio, e_i = error en una dimensión (esto es, *x*, *y* o *z*; Apéndice 1, Ecuación 1 o 7), S = desvío estándar del error, γ_1 = coeficiente de asimetría, γ_2 = coeficiente de curtosis, n = número de puntos de control independientes (ICP), i = rango de números enteros entre 1 y n.

APÉNDICE 3. Propagación del error desde los MDE a las ortoimágenes

Sistema de curvas que predice el error planimétricos ocasionado por el error en los MDE cuando éstos son utilizados para ortorrectificar datos adquiridos con un determinado ángulo de inclinación fuera del nadir, utilizando el modelo físico de ortorrectificación desarrollado por Thierry Toutin del Centro Canadiense de Percepción Remota (M3D-CCRS). La figura original puede ser consultada en: http://www.earsel.org/Advances/4-2-1995/4-2_15_Toutin.pdf



Adaptado de Toutin (1995)

[1] Para obtener el error planimétrico teórico esperado se utilizó al error lineal con un 95% de probabilidad como estimador del error en los MDE (Tabla 1). Para SRTM-C, con distribución no-normal, se utilizó el límite superior del rango no-aislado (Figura 5).

© Los autores
www.geo-focus.org