

La escala cartográfica de la imagen de satélite. Caso particular de las imágenes Ikonos y QuickBird

E. Corbelle Rico, M.L. Gil Docampo, J. Armesto González, T. Rego Sanmartín
eduardo.corbelle@gmx.net

*Departamento de Enxeñería Agroforestal. Escola Politécnica Superior
Universidade de Santiago de Compostela.*

RESUMEN

Una duda habitual de los técnicos y científicos que utilizan imágenes de satélite en sus proyectos es la relativa a la escala máxima de trabajo que una determinada imagen puede permitir. Este artículo repasa los conceptos básicos sobre precisión geométrica y calidad visual de una imagen espacial y su relación con la escala a través de los diferentes criterios o estándares de precisión planimétrica existentes, en base a los cuales se puede indicar la escala cartográfica máxima alcanzable en un mapa de imagen espacial. Se aplican estos estándares a las imágenes de alta resolución IKONOS y QuickBird para presentar resultados de escalas máximas obtenidas con ellas.

PALABRAS CLAVE: imagen espacial de alta resolución, escala, precisión geométrica.

ABSTRACT

A common doubt among scientists and technicians that use remotely sensed imagery in their day-to-day work is the maximum allowable scale they can expect of the data. In this paper we review the basic concepts about geometric accuracy and visual quality of satellite images and their relationship with scale. A number of map accuracy standards are available that indicate end-users the maximum scale they should use. The recommendations of these standards are compared and applied to high-resolution satellite imagery (IKONOS, QuickBird) indicating the maximum scales that can be expected to be achieved using them

KEY WORDS: high resolution satellite imagery, scale, geometric accuracy.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día son muchas y muy variadas las disciplinas científicas y técnicas que utilizan de modo cotidiano imágenes espaciales procedentes de diferentes sensores. La teledetección constituye una fuente de información utilizada a diario por un gran número de profesionales cuya formación y dedicación no está relacionada directamente con la cartografía. Como consecuencia, entre muchos de estos profesionales surge con frecuencia la cuestión de hasta qué escala resulta razonable emplear (por ejemplo en la generación de cartografía) las imágenes de que disponen.

El concepto de escala en cartografía está ligado a la cantidad de información contenida en el producto cartográfico, de modo que esta aumenta confor-

me se reduce el denominador de escala. Sin embargo y por otra parte, aunque un determinado elemento (por ejemplo una carretera secundaria) pueda estar presente en dos mapas diferentes, se espera que su localización (en coordenadas geográficas o UTM) sea más precisa en el de mayor escala. La garantía de esta fiabilidad en la representación viene dada por la tolerancia, que limita el error de posición admisible sobre el papel. En consecuencia, para una determinada tolerancia el error (en unidades del terreno) será menor cuanto mayor sea la escala.

En el caso de las imágenes captadas desde satélites de observación de la Tierra es común en la bibliografía el asociarlas con ciertas escalas comunes en función del sensor del que proceden (por ejemplo, López Vizoso 1989). En general, la reco-

mendación de determinadas escalas para cada tipo de imagen espacial está condicionada por dos factores: a) por un lado se busca que sea posible apreciar el máximo de información que contiene la imagen, condicionada por su resolución espacial; b) por otro lado se requiere que la precisión planimétrica o error de posición de los elementos presentes en la imagen se mantenga dentro de determinados valores. No obstante, este tipo de recomendaciones generales deben ser tomadas como orientativas, ya que el error planimétrico presente en la imagen depende del proceso de corrección geométrica utilizado y por lo tanto no es igual para todas las imágenes de igual resolución espacial, aún en el caso de que fueran captadas por el mismo sensor.

En este trabajo se analizan las fuentes de error geométrico en una imagen de satélite, los métodos más habituales para su corrección y posterior cálculo del error planimétrico resultante. Finalmente se exponen los posibles criterios de precisión planimétrica y calidad visual que se pueden emplear en la generación de mapas impresos a partir de imágenes de satélite, con mención especial de los resultados esperables con imágenes espaciales de alta resolución de los satélites IKONOS y QuickBird.

ERROR GEOMÉTRICO EN LA IMAGEN ESPACIAL

Fuentes de error geométrico

La imagen espacial no procesada no debería ser utilizada como documento cartográfico, ya que en ella están presentes errores geométricos -debidos a diferentes factores- que hacen que los objetos no aparezcan representados en su verdadera forma y/o posición. Es decir, la imagen no procesada no puede ser utilizada directamente en un sistema de información geográfica o integrada con otros productos cartográficos. Los factores que provocan este tipo de distorsiones son numerosos, pero pueden ser clasificados en tres categorías (Toutin 2004):

Distorsiones debidas a la plataforma espacial e instrumentos de captura. En este grupo podemos citar las variaciones en la órbita de la plataforma, errores debidos al sensor (por ejemplo variaciones en la velocidad de barrido), y errores de otros instrumentos a bordo.

Distorsiones debidas a la atmósfera o a la superficie terrestre. En esta categoría se encuentran la refracción debida a la atmósfera, el desplazamiento

de los objetos en la imagen debido al relieve del terreno y el efecto de la rotación terrestre.

Distorsiones debidas al uso de una determinada proyección cartográfica.

La importancia de cada una de las fuentes de error en el error total depende de cada sistema de captura: por ejemplo, las distorsiones debidas a cambios en la órbita de la plataforma son importantes en el caso de la imagen de alta resolución Quickbird, mientras que su influencia es mucho menor en el caso de la imagen de resolución mediana Landsat-MSS (Toutin 2004).

Corrección geométrica

Conforme el uso de imágenes de satélite ha sido más extendido se han ido desarrollando diferentes métodos para aplicarle la corrección geométrica necesaria. Una revisión detallada de los métodos más adecuados para cada tipo de imagen y de su proceso de trabajo puede consultarse en Toutin (2004). Dejando aparte aquellos que se apoyan exclusivamente en parámetros orbitales, que suelen ser utilizados por las casas distribuidoras como una corrección previa y que no evitan la necesidad de corrección posterior por parte del usuario final, los métodos de corrección geométrica pueden ser clasificados en dos grandes grupos: según incorporen o no un modelo digital del terreno para corregir los errores de desplazamiento debido al terreno, se los denomina métodos de ortorrectificación y métodos de rectificación, respectivamente (Cuartero y Felicísimo 2003). Por lo demás, todos ellos basan su funcionamiento en adaptar la imagen a un conjunto de puntos de coordenadas conocidas (*puntos de control o puntos de apoyo*) mediante un ajuste de mínimos cuadrados.

La calidad conseguida en el ajuste se evalúa a través del valor de residuo medio cuadrático (medido en unidades del terreno), que en ocasiones se asimila de manera errónea al error planimétrico presente en la imagen corregida. El residuo de ajuste no está necesariamente relacionado con la calidad final que se obtiene después del proceso de corrección: antes bien, refleja de modo conjunto la idoneidad del modelo matemático utilizado, la precisión de las coordenadas de los puntos de control, y la precisión en la localización de estos en la imagen. De este modo, un valor elevado de residuo de ajuste puede indicar una mala elección del modelo matemático empleado en la corrección y/o una baja calidad de los puntos de control, y por tanto indica que el error de posición presente en la imagen corregida será

alto. Sin embargo, un valor bajo de residuo no asegura una buena calidad final: situándonos en un caso extremo, el uso del número mínimo necesario de puntos de control (que depende del número de coeficientes del modelo matemático) producirá un residuo igual a cero, sin que obviamente esto signifique que el error contenido en la imagen sea inexistente.

Como resultado de lo anterior, para estimar el error presente en la imagen corregida se deben utilizar puntos de comprobación de coordenadas conocidas, independientes de los puntos de control.

Cuantificación del error

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. A partir de las discrepancias observadas se pueden calcular los siguientes estadísticos:

a) Error medio:

$$\bar{e}_x = \frac{\sum_{i=1}^n e_{xi}}{n} \quad \bar{e}_y = \frac{\sum_{i=1}^n e_{yi}}{n}$$

donde e_{xi} y e_{yi} representan la diferencia entre las coordenadas x e y reales y las tomadas de la imagen, y n representa el número de puntos de comprobación.

Normalmente el error medio debería resultar un valor próximo a cero debido a que el proceso de corrección geométrica tiende a anular los errores de tipo sistemático que provocan el sesgo en la posición de los elementos en la imagen.

b) Error medio cuadrático o RMSE (*root mean square error*):

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_{xi}^2}{n}} \quad RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_{yi}^2}{n}}$$

El RMSE es un indicador muy empleado, ya que evalúa de modo conjunto la cuantía del sesgo (indicado por el error medio) como de la dispersión (indicado por la desviación típica de los errores) del error de posición en la imagen.

Resulta interesante resaltar que cuando el error medio tiende a cero el RMSE se aproxima a la desviación típica de los errores. Por lo tanto, bajo la hipótesis de que el error planimétrico de la imagen sigue una distribución normal, puede afirmarse que el RMSE corresponde aproximadamente al 68 % de probabilidad (el 68 % de los errores en la imagen tiene un valor inferior al RMSE). Manteniendo la hipótesis de normalidad es posible estimar los valores de error unidimensional (en x o y) con un 90%, 95% y 99% de probabilidad, multiplicando el valor de RMSE (en x o y) por 1,65, 1,96 y 2,58 respectivamente (Kay et al. 2003). El error máximo absoluto (en x o y) puede ser aproximado multiplicando el RMSE por 3,89 (correspondiente al 99,99% de probabilidad).

c) Error circular o CE (*circular error*):

El CE es un estadístico que indica el error posicional bidimensional, que resulta de la combinación del error en las direcciones x e y . El cálculo del CE se apoya en fundamentos teóricos de estadística bivalente, de los que se puede encontrar una explicación exhaustiva en ACIC (1968). Sin embargo, para su cálculo no es necesario recurrir a complicados desarrollos matemáticos: una aproximación bastante simple es la propuesta en FGDC (1998), para el cálculo del error circular correspondiente a probabilidades del 90 y 95 %:

c1) En caso de que $RMSE_x = RMSE_y$

$$CE_{95} \cong 1,7308 \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$$

$$CE_{90} \cong 1,5175 \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$$

c2) En caso de que $RMSE_x \neq RMSE_y$ y siempre que se cumpla

$$0,6 < \frac{RMSE_{\min}}{RMSE_{\max}} < 1,0$$

$$CE_{95} \cong 1,2239 (RMSE_x + RMSE_y)$$

$$CE_{90} \cong 1,0731 (RMSE_x + RMSE_y)$$

ESTÁNDARES DE PRECISIÓN CARTOGRÁFICA

Los estándares de precisión cartográfica son normas que establecen la tolerancia aceptada en la representación cartográfica, habitualmente relacionándola con alguno de los estadísticos indicadores del error de posición que enunciamos en el aparta-

do anterior. Una revisión de los más importantes aparece tratada en Atkinson et al. (2001), por lo que en este trabajo nos limitaremos a hacer algunas consideraciones prácticas sobre ellos.

De modo general los estándares pueden ser clasificados en dos grandes grupos: a) los que establecen un valor de tolerancia o error admisible sobre el papel y por lo tanto permiten establecer una escala máxima de representación; b) los que simplemente proporcionan herramientas para estimar el error planimétrico y dejan la decisión de la escala máxima en manos del usuario final.

Dentro del primer grupo (estándares orientados a sugerir una escala máxima de representación) podemos citar:

a) NMAS (*National Map Accuracy Standard*) de los EEUU (USBB 1947): en este estándar la tolerancia (error admisible) está fijada en 0,846 mm o en 0,508 mm -sobre el papel- según la escala de representación, y se utiliza el error circular para el 90% de probabilidad como estadístico de comparación:

Para escalas mayores que 1:20.000,

$$CE_{90, \text{papel}} \leq \frac{1}{30} \text{ pulgadas} \approx 0,846 \text{ mm}$$

Para escalas menores que 1:20.000,

$$CE_{90, \text{papel}} \leq \frac{1}{50} \text{ pulgadas} \approx 0,508 \text{ mm}$$

b) Estándar de la ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) para mapas a gran escala (ASPRS 1989): fija la tolerancia (error admisible) sobre el papel en 0,25 mm y lo relaciona con el RMSE máximo medido en uno de los dos ejes del plano, de modo que se debe cumplir. El resultado es un estándar algo más restrictivo que el NMAS para mapas a escalas superiores a 1:20.000. Un aspecto interesante del estándar ASPRS es que establece dos clases adicionales, que se justifican por el hecho de que no todas las aplicaciones tienen los mismos requerimientos de precisión. Así, la Clase II admite una tolerancia igual al doble (0,50 mm) que la Clase I (la expuesta al inicio), y la Clase III admite el triple (0,75 mm). El uso de estas últimas, no obstante, se debe realizar con cuidado ya que daría lugar a productos con una calidad posicional bastante baja.

c) Finalmente, en la bibliografía española es frecuente la alusión a la “precisión cartográfica convencional”, fijada en una tolerancia sobre el papel de 0,2 mm. Desafortunadamente no existe una norma oficial, o al menos claramente establecida,

que aconseje sobre su uso. La magnitud con la que razonablemente se debe comparar esta tolerancia es el RMSE máximo en uno de los ejes del plano, con lo que resulta un estándar más restrictivo que el NMAS y ligeramente más estricto que el de la ASPRS. Existe cierta confusión en cuanto a que la precisión cartográfica convencional se corresponda en el terreno con el error máximo que sería posible detectar en la imagen (casi cuatro veces el RMSE, según lo enunciado en el apartado 2.3): semejante interpretación resultaría en un estándar cuatro veces más estricto que el ASPRS.

En años recientes ha aparecido un segundo grupo de estándares y recomendaciones de organismos internacionales que se liberan de la dependencia respecto de la escala sobre papel, dadas las especiales características de los productos digitales, y en concreto de las imágenes de satélite. El motivo de este cambio es la tendencia a utilizar los productos digitales en pantalla y por lo tanto la dependencia cada vez menor respecto de los productos en papel. Lo que pretenden estas nuevas aproximaciones al problema es proporcionar metodologías para estimar el error planimétrico, por un lado a través de la definición de los estadísticos que enumeramos en el apartado anterior y por otro lado mediante criterios relativos a la calidad y distribución de los ICPs. En este grupo se incluyen el NSSDA (*National Standard for Spatial Data Accuracy*) de los EEUU (FGDC 1998) y las *Directrices para el Control de Calidad de Ortoimágenes* aprobadas por la Comisión Europea (2003). Ninguno de estos dos documentos propone un método de calcular la escala máxima utilizable, de modo que esta decisión debe ser tomada por el usuario final en función del error contenido en la imagen (expresado, por ejemplo, por el CE95) y de sus necesidades de precisión planimétrica.

PRECISIÓN GEOMÉTRICA DE LAS IMÁGENES DE ALTA RESOLUCIÓN

La imagen espacial de alta resolución tiene un alto potencial en la generación y actualización de cartografía dado su elevado nivel de detalle. En este grupo se incluyen las imágenes IKONOS y Quickbird, con resolución espacial de 1 y 0,60 metros respectivamente. Resultados presentados por otros autores indican que es posible alcanzar precisiones geométricas de 1,3 metros RMSE en el caso de IKONOS (Toutin 2001), o de 1,10 metros RMSE en el caso de Quickbird (Kay et al. 2003),

cifras que deben ser consideradas como orientativas ya que la precisión final depende, entre otras cosas, del terreno y de la calidad de los puntos de control. Estudios realizados en condiciones especialmente favorables, y por ello quizá poco representativos, han obtenido para QuickBird precisiones de hasta 0,8 metros RMSE (Cheng et al. 2003).

Teniendo en cuenta las precisiones citadas y dependiendo del estándar de precisión escogido, la escala normalizada máxima utilizable en imágenes IKONOS o QuickBird puede llegar a ser de 1:10.000, 1:5.000 o incluso (como se aprecia en la tabla 1) de 1:2.500 (la escala normalizada más próxima a 1:2.033), si bien esta última sólo será posible en muy pocos casos en los que las características de la imagen (por ejemplo el ángulo nadiral), de los puntos de control y del relieve del terreno, entre otros factores, sean especialmente favorables.

Imagen	Precisión planimétrica		Escala alcanzable (no normalizada)		
	RMSE	CE90	NMAS	ASPRS (Clase I)	0,2 mm y RMSE
IKONOS Quickbird	1,3 m	2,79 m	1:3.300	1:5.200	1:6.500
	1,1 m	2,36 m	1:2.800	1:4.400	1:5.500
	0,8 m	1,72 m	1:2.033	1:3.200	1:4.000

Tabla 1. Precisión planimétrica y escala alcanzable para imágenes de alta resolución.
(Elaboración propia a partir de Toutin 2001, Kay et al. 2003 y Cheng et al. 2003).

ESCALA Y CALIDAD VISUAL

El segundo factor a considerar a la hora de emplear imágenes de satélite en formato papel, además del error planimétrico, es la calidad visual. El uso de escalas grandes tiende a acentuar el efecto de “pixelado” de la imagen, lo que afecta negativamente a su apariencia y a la posibilidad de extracción de información. Algunos autores proponen como aproximación una regla práctica según la que la imagen debe ser impresa a 10 píxeles/mm para obtener una buena calidad visual, lo que equivale a un tamaño de píxel sobre el papel de 0,1 mm (Doyle 1984, Jacobsen et al. 1998). Sin embargo este límite es probablemente excesivo: Schiwe (1995) refiere una impresión a 5 píxeles/mm como perfectamente aceptable; Ball Aerospace (2005), en sus recomendaciones para la impresión de imágenes QuickBird, sugiere una calidad de impresión de 80 píxeles cada 300 dpi (*dots per inch*, puntos por pulgada), lo que equivale a

$$\frac{80 \text{ pix} * 300 \text{ dots} / \text{inch}}{300 \text{ dots} * 25,4 \text{ mm} / \text{inch}} = 3,14 \text{ pix} / \text{mm}$$

Esta última resolución, ofrece suficiente calidad visual.

Aplicando una impresión de 3,14 píxeles/mm al caso de las imágenes IKONOS y QuickBird, resultan unas escalas de 1:3.140 y 1:1.880 respectivamente. De la comparación con las que aparecen en la tabla 1 se desprende que las derivadas del criterio de calidad visual son más detalladas en todos los casos, lo que significa que este factor es menos limitante que el de precisión planimétrica.

CONCLUSIONES

En las últimas décadas se ha producido una generalización del trabajo con productos cartográficos digitales, generalmente integrados en sistemas de información geográfica, que reduce la dependencia respecto del uso de productos en papel y prácticamente lo limita a la presentación de resultados finales. En concordancia con esta situación, la tendencia actual en relación con productos cartográficos digitales como la imagen de satélite es hacer referencia a su precisión planimétrica mediante alguno de los estimadores estadísticos disponibles y evitar la mención de una escala de representación concreta. Para aquellos usuarios que deseen disponer de una escala recomendada existen diversos estándares cartográficos que pueden ser utilizados (NMAS, ASPRS). Estos estándares, basados en la calidad geométrica de la imagen, son –al menos en el caso de imágenes de alta resolución– más restrictivos que los condicionantes de calidad visual.

Los resultados de calidad geométrica citados en la bibliografía para las imágenes espaciales de alta resolución IKONOS y QuickBird indican que es posible alcanzar una precisión planimétrica del orden de 1 m RMSE. Estos resultados, dependiendo del estándar de calidad cartográfica aplicado, permiten generar fotomapas en papel a escalas de 1:10.000 o 1:5.000. De modo particular, en algún caso en que el error geométrico fuese menor sería posible utilizar escalas ligeramente mayores, sabiendo que aun en ese caso la imagen impresa resultante contaría con una calidad visual satisfactoria.

BIBLIOGRAFÍA

- AERONAUTICAL CHART AND INFORMATION CENTER (ACIC), 1968. *Principles of error theory and cartographic applications*. ACIC Technical Report nº 96. U.S. Air Force, Saint Louis, Missouri.
- AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS), 1989. "ASPRS interim accuracy standards for large-scale maps." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 56, nº 7.
- ATKINSON GORDO, A.D. J.; GARCÍA BALBOA, J.L. y ARIZA LÓPEZ, F. J., 2001. "Los diferentes test para el control de calidad posicional en cartografía." *Ingegraf, XIII Congreso internacional de ingeniería gráfica*, Badajoz.
- BALL AEROSPACE, 2005. "QuickBird images publishing guidelines". http://www.ballaerospace.com/qb_publish.html
- COMISIÓN EUROPEA, 2003. *Guidelines for Best Practice and Quality Checking of Ortho Imagery (Issue 2.4)* http://agrifish.jrc.it/Documents/lpis/2402v2_4.pdf
- CUARTERO, A., FELICÍSIMO, A. M., 2003. "Rectificación y ortorrectificación de imágenes de satélite: análisis comparativo y discusión." *GeoFocus (Artículos)*, nº 3.
- CHENG, P., TOUTIN, T., ZHANG, Y., WOOD, M., 2003. "QuickBird – Geometric Correction, Path and Block Processing and Data Fusion." *Earth Observation Magazine*, vol. 12, nº 3.
- DOYLE, F. J., 1984. "Surveying and mapping with space data". *ITC Journal*, nº 4.
- FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE (FGDC), 1998. *Geospatial Positioning Accuracy Standards. Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*. (FGDC-STD-007.3-1998) F.G.D.C., Washington, D.C.
- JACOBSEN, K., KONECNY, G., WEGMANN, H., 1998. "High resolution sensor test comparison with SPOT, KFA1000, KVR1000, IRS-1C and DPA in lower saxony". *IAPRS*, vol. 32 / 4, pp. 260-269.
- KAY, S., SPRUYT, P., ALEXANDROU, K., 2003. "Geometric Quality Assessment of Orthorectified VHR Space Image Data." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69: 484-491.
- LÓPEZ VIZOSO, J. M., 1989. "La observación de la Tierra desde el espacio: el mapa de ocupación del suelo de la Comunidad Económica Europea". *Estudios Geográficos*, vol. 50, pp. 409-434.
- SCHIEWE, J., 1995. "Cartographical Potential of MOMS-02/D2 Image Data". En: Fritsch, D., Hobbie, D. (eds.) *Photogrammetric Week '95*, Wichmann Verlag, pp. 95-106.
- TOUTIN, TH., 2001. "Geometric processing of Ikonos GEO images with DEM." *Proceedings of the Joint ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from Space 2001"*, Hannover.
- TOUTIN, TH., 2004. "Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods." *International Journal of Remote Sensing*, 25 (10), pp. 1893-1924.
- U.S. BUREAU OF THE BUDGET (USBB), 1947. *United States National Map Accuracy Standards*. U.S.B.B., Washington, D.C.