

Efecto de la atmósfera en la resolución óptica de la Z/I Digital Mapping Camera

L. Martínez*, M. E. Soler, F. Pérez y R. Arbiol

Àrea de Teledetecció. Institut Cartogràfic de Catalunya. Parc de Monjuïc, s/n. 08038 Barcelona

Resumen

El Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) opera la cámara digital aerotransportada Z/I Digital Mapping Camera (DMC) para diversos trabajos cartográficos. Como todo sistema fotográfico de este mismo tipo la imagen padece una degradación en su resolución debida al sistema formador y al efecto de la atmósfera, por lo que la medida objetiva de la resolución con la cámara va más allá de la dimensión geométrica del píxel y el Ground Sampling Distance (GSD). En este trabajo se analiza la fracción de pérdida de resolución que causa la atmósfera en función de las condiciones atmosféricas. Para estimar la resolución se emplea una reconstrucción de la Función de Dispersión del Borde (Edge Spread Function, ESF) para obtener la Función de Dispersión de la Línea (Line Spread Function, LSF), cuyo Full Width at Half Maximum (FWHM) proporciona un valor de resolución en magnitud píxel. Para simular la atmósfera se ha aplicado el código de transferencia radiativa Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) para el que se han considerado variaciones en los modelos de atmósfera, aerosoles y geometrías de iluminación-observación para el rango espectral de la DMC. La metodología descrita ha sido aplicada a un blanco radiométrico construido como un escalón radiométrico en las campañas de calibración del ICC en el área de Banyoles (España). Una imagen sintética del mismo ha sido procesada con la simulación atmosférica y posteriormente analizada para obtener la pérdida de resolución debida exclusivamente a la atmósfera. Los resultados de las simulaciones muestran una elevada dependencia con el tipo y cantidad de aerosol, y también son compatibles con la medida de resolución de la imagen real del blanco tomada por la cámara.

Palabras clave: resolución, función de dispersión de línea, función de dispersión de escalón, atmósfera, DMC.

Abstract

Atmospheric influence on the Z/I Digital Mapping Camera optical resolution

The Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) operates the airborne digital camera Z/I Digital Mapping Camera (DMC) for cartographic purposes. This imaging system suffers from certain resolution degradation due to both the optical system and the atmosphere. Therefore, real resolution of the camera is different from purely geometrical pixel size and the Ground Sampling Distance (GSD). In this work, camera resolution loss caused by the atmosphere as a function of the atmospheric radiative conditions is analysed. The resolution in pixel units is evaluated as the Full Width at Half Maximum (FWHM) of the Line Spread Function (LSF) computed from a reconstruction of the Edge Spread Function (ESF). The Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) radiative transfer code is used to simulate the atmosphere. Atmosphere type, aerosol model and total load, illumination and observation geometries and spectral range are taken into account when computing simulations. The described methodology has been applied to an edge radiometric target at ICC test site on Banyoles (Spain) area. A synthetic image of the edge has been processed with the atmospheric simulations and then its resolution analysed to obtain the resolution loss caused by the atmosphere. The simulations results show a high correlation between resolution loss and aerosol model and total load. The results are also compatible with the resolution measures on the real image taken with the camera.

Key words: resolution, Line Spread Function, Edge Spread Function, atmosphere, DMC.

* Autor para la correspondencia: lucar.martinez@icc.cat

Recibido: 04-03-10; Aceptado: 10-05-11.

Introducción

El Institut Cartogràfic de Catalunya dispone de una línea de producción cartográfica totalmente digital gracias a la incorporación en 2004 y 2005 de cámaras fotogramétricas digitales. El modelo elegido fue la Digital Mapping Camera (DMC) desarrollada y comercializada por Zeiss/Intergraph (Z/I). Estas cámaras digitales presentan una resolución superior para una misma altura de vuelo frente a las analógicas. Por contra, la relación base/altura es mejor en el caso analógico, debido a la diferencia de formato de las imágenes.

El necesario cambio en los parámetros de configuración de un vuelo tras la incorporación de estas cámaras al flujo productivo generó la necesidad de disponer de un método para determinar de forma objetiva la calidad de los vuelos de cada proyecto, más allá de las puras dimensiones geométricas del píxel. La calidad de imagen es compleja de medir pero, cuanto más resolución y menos ruido tengamos, más contribuimos a una mejor calidad de imagen. La resolución hace referencia al poder de un instrumento óptico para separar dos objetos de una imagen o también el tamaño del mínimo detalle que podrá distinguirse al utilizar dicho instrumento. Este concepto se desarrolló inicialmente en el ámbito de la astronomía, donde se plantea la necesidad de separar fuentes puntuales de luz. Para el caso particular de la fotografía aérea la pérdida de resolución óptica implica una menor capacidad de distinguir las transiciones radiométricas presentes en la escena fotografiada. Así pues, un parámetro clave para determinar la calidad de las imágenes de la cámara es la resolución óptica efectiva de las imágenes que lo integran, más que el Ground Sampling Distance (GSD) y el tamaño de los píxeles de la imagen proyectados en el suelo. La pérdida o degradación de la resolución se debe tanto al sistema de captación como a la transmisión de la señal electromagnética a través de la atmósfera. Respecto al sistema de captación, debe tenerse en consideración el límite óptico debido a la difracción, que se calcula mediante el criterio de Rayleigh, y la electrónica de adquisición, cuya calidad y nivel de calibración pueden introducir ruido y artefactos radiométricos

que degraden la resolución de la imagen. Por su parte, la atmósfera condiciona y altera la transmisión de la radiación solar debido a la absorción y dispersión causada por gases y aerosoles (Kaufmann, 1989). La absorción atmosférica es el fenómeno responsable de la atenuación de los flujos directos de radiancia que alcanzan la cámara para determinadas regiones espectrales. En el caso que nos ocupa, los contrastes radiométricos se ven reducidos debido a la absorción atmosférica, puesto que tal como describe la Ley de Beer-Lambert, la cantidad de energía transmitida es una fracción de la energía incidente. La dispersión atmosférica se caracteriza principalmente, para la región de trabajo de la DMC, por un cambio en la dirección de propagación de la radiación tal como describen las leyes de Rayleigh y Mie. Esto implica que parte de la radiación inicial no alcanza el sensor, mientras que sí lo hace radiación que ha modificado su camino y por tanto no procede del objeto fotografiado. Así, la dispersión atmosférica implica que las zonas de contraste radiométrico, aquellas de transición entre objetos de diferente radiometría, se degradarán haciendo la distinción entre ambos menos evidente.

La magnitud más extendida para expresar la resolución espacial de un sensor es la MTF (Modulation Transfer Function o también Función de Transferencia de Modulación). La MTF es un parámetro de calidad óptica objetivo que aporta información sobre el funcionamiento y calidad de un sistema óptico y describe cómo resuelve ese sistema óptico pares de líneas a cada frecuencia. Cualquier objeto puede ser descompuesto en todas sus frecuencias espaciales y así la MTF permite calcular cómo se atenúan los contrastes (modulaciones) al formar la imagen del objeto en cada frecuencia espacial. Para la determinación de la MTF se observan con el sistema óptico a estudiar redes de contraste constante y frecuencia creciente midiendo el contraste resultante en las imágenes obtenidas. Con este procedimiento se busca la frecuencia más alta que el sistema óptico ya no resuelve y por tanto su límite de resolución. Esta metodología es poco operativa puesto que precisa de la construcción de patrones de líneas (como el *1951 USAF resolution test chart*) del tamaño adecuado a la escala de la imagen.

La Función de Dispersión Puntual o Point Spread Function (PSF) describe todas las perturbaciones que el valor radiométrico de un píxel sobre la imagen padece debido a los mencionados factores ópticos, electrónicos y atmosféricos. La PSF describe la respuesta del sensor a un objeto puntual observado. La relación entre PSF y MTF viene dada a través de la transformada de Fourier, de manera que la MTF es el módulo de la transformada de Fourier de la PSF. Como en el caso anterior, existe una dificultad práctica para la medición de la PSF por la necesidad de localizar objetos en la imagen cuya radiometría sea la de un impulso o un punto suficientemente pequeño y contrastado con su entorno.

La Función de dispersión de línea o Line Spread Function (LSF) es la respuesta dada por el sistema de captación a una línea observada sobre el terreno. Lógicamente esta última es muy importante cuando se desea realizar detección de bordes en la imagen. En cierto modo es equivalente a la PSF en una dimensión, por lo que la LSF es una buena aproximación en una dirección de la PSF. Aunque de nuevo la localización de una escena con un objeto lineal en la misma es harto compleja sí es posible emplear una alternativa más plausible. Dicha opción consiste en la reconstrucción en la imagen de la Función de Dispersión de Borde o Edge Spread Function (ESF) en un escalón radiométrico natural o artificial, que debidamente parametrizada y calculada su derivada nos proporcione la LSF, modelizada con una función de tipo gaussiano. Llegados a este punto, la medida Full Width at Half Maximum (FWHM) de la LSF proporciona un valor de resolución en magnitud píxel (dominio espacial) en la dirección perpendicular a la línea. A su vez, si se desea trabajar con una caracterización de la resolución más afín a los parámetros ópticos habituales, la transformación directa de Fourier de la LSF proporciona la MTF.

De todos los factores mencionados como responsables de la pérdida de resolución de los sensores de teledetección, la atmósfera es el menos susceptible de ser controlado o calibrado en laboratorio por motivos obvios. A su vez, la propia dinámica de la atmósfera hace que las parametrizaciones climatológicas de la misma sean generalmente insuficientes para determi-

nar el comportamiento radiativo exacto de la misma en el instante de captura de una imagen o en el periodo de captura de una pasada completa de imágenes de cámara aerotransportada. Sin embargo, la consideración de las diversas condiciones en las que se puede realizar una adquisición de teledetección sí puede ser útil para acotar el impacto que la atmósfera pueda tener en las imágenes.

Los códigos de transferencia radiativa permiten al usuario obtener parámetros atmosféricos (radiancias atmosféricas, transmisividades, etc.) o también simular la radiancia que mediría un sensor a partir de una serie de datos de entrada, como la geometría, la sensibilidad espectral del canal, el estado de la atmósfera, etc. Los códigos de transferencia radiativa son una herramienta fundamental a la hora de trabajar imágenes de teledetección, ya que permiten realizar la corrección atmosférica, así como simulaciones útiles en el desarrollo de algoritmos para obtener parámetros derivados. Algunos ejemplos de códigos son: MODTRAN, SMAC, 6S.

A continuación se describe un algoritmo basado en la reconstrucción de la Función de Dispersión del Borde para obtener un valor de resolución y un procedimiento para simular el efecto de la atmósfera mediante un código de transferencia radiativa sobre un patrón sintético. Posteriormente se analiza el resultado de combinar ambos procedimientos y finalmente se compara con la resolución determinada en la imagen DMC real del patrón.

Material y métodos

Construcción de la Función de dispersión de borde (ESF)

La metodología propuesta para la medida de la resolución de la imagen en magnitud píxel (Soler *et al.*, 2007) es el proceso de una región que contiene un contorno o borde observado en la imagen como un escalón radiométrico, semejante al planteado para satélite por Ryan *et al.* (2003). En dicho contorno se realiza un ajuste mínimo cuadrático sobre la función bidimensional del escalón radiométrico, como en el método propuesto por Blonski (2001) y

Blonski *et al.* (2002), que se postula como una función de tipo sigmoide:

$$f(j, i) = P_4 + \frac{P_1}{1 + e^{P_3(i * \cos P_5 + j * \sin(P_5 - P_2))}} \quad [1]$$

$P_k \in \mathfrak{R}, k = 1, \dots, 5$

donde $\{i, j\}$ son los índices fija y columna de la imagen.

El ajuste mínimo-cuadrático proporciona valores para los cinco parámetros y esta función es derivada para obtener la LSF. La medida de la resolución será la anchura-(FWHM) de la LSF.

Simulación del efecto de la atmósfera

La radiancia medida por la cámara L^* , puede relacionarse con la reflectividad aparente ρ^* , como:

$$\rho^* = \frac{\pi L^*}{\mu_s E_s} \quad [2]$$

donde:

- E_s es la irradiancia solar extraterrestre.
- μ_s es el coseno del ángulo cenital solar.

Teniendo en cuenta los fenómenos de interacción con la atmósfera descritos y según Staez y Williams (1997), es posible notar la radiancia solar que alcanza la cámara cuando se observa una superficie horizontal como:

$$L^* = A \frac{\rho_c}{(1 - \langle \rho_c \rangle S)} + B \frac{\langle \rho_e \rangle}{(1 - \langle \rho_e \rangle S)} + L_a \quad [3]$$

donde:

- ρ_c es la reflectividad corregida de la superficie observada.
- $\langle \rho_e \rangle$ es la reflectividad corregida del entorno en el que se encuentra la superficie observada (una ventana de píxeles).

— S es el albedo esférico de la atmósfera.

— L_a es la radiancia retrodispersada por la atmósfera hacia el sensor.

— A y B dan cuenta de la radiación directa y difusa, respectivamente, y de su interacción con la atmósfera.

Los parámetros A , B , S y L_a caracterizan tanto la geometría de observación e iluminación, como las condiciones atmosféricas consideradas en este trabajo (Tabla 1) mediante el código de transferencia radiativa Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) descrito en Vermote *et al.* (1997).

El cálculo de los parámetros A , B , S y L_a se realiza a partir de las magnitudes L_g o radiancia que alcanza el sensor desde la superficie observada, y L_p o radiancia que alcanza el sensor desde el entorno de la superficie observada y por la atmósfera, que para un medio de reflectividad uniforme se notan como

$$L_g = A \frac{\rho_c}{1 - \rho_c S} \quad [4]$$

$$L_p = B \frac{\rho_c}{1 - \rho_c S} + L_a \quad [5]$$

Ambas magnitudes L_g y L_p pueden obtenerse mediante códigos de transferencia radiativa funcionando en modo directo. Así, la obtención de los valores de A , B , S y L_a es trivial mediante la resolución de sistemas de ecuaciones. Los resultados correspondientes para cada conjunto de situación atmosférica y geométrica son guardados en una base de datos para aplicarlos cuantas veces sea necesario.

La Figura 1 muestra el campo de calibración radiométrica ICC de Banyoles (España). El 25

Tabla 1. Condiciones geométricas y atmosféricas consideradas para la simulación (total, 18.000) mediante el código de transferencia radiativa 6S

Parámetro	Rango de valores
Modelo atmósfera	Estándar US62, Tropical, Latitudes medias invierno, Latitudes medias verano, Subártica verano y Subártica invierno
Modelo aerosoles	Continental, marítimo y urbano
Cantidad de aerosoles (visibilidad en km)	7,5, 15, 30, 60 y 120
Ángulo de iluminación (ángulo cenital, cenit = 0°)	0, 30, 45, 60 y 75
Ángulo de observación (ángulo cenital, cenit = 0°)	0, 15, 30, 45 y 60
Diferencia acimutal iluminación-observación	0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 y 315



Figura 1. Fotografía aérea del campo de calibración ICC en Banyoles (2005). Blanco radiométrico empleado en la parte superior izquierda del campo (cubierta blanca sobre suelo).

de junio de 2005 se tomaron imágenes DMC desde un Cessna Caravan B209, entre las 10 y las 11 am (UTC) y se realizaron medidas de radiometría de campo simultáneas. En la parte superior del mismo puede observarse la lona blanca que en combinación con el suelo de tierra forman el escalón radiométrico objeto de este estudio.

Empleando la geometría del blanco radiométrico y a partir de las medidas de reflectividad obtenidas en campo para la lona blanca y

el suelo, se construye una imagen sintética del conjunto a la que se aplica la Ecuación 3 con los valores obtenidos para cada simulación de A, B, S y La (Fig. 2).

Resultados

La Figura 3 nos muestra el histograma de la resolución (FWHM de la LSF en unidades píxel) del blanco radiométrico tipo escalón tras aplicar las simulaciones atmosféricas para canal pancromático. Puesto que no se disponen de escalones radiométricos en todas las direcciones, no se distingue entre las condiciones along-track y cross-track para este trabajo. Puede observarse una distribución asimétrica de valores de resolución con una extensa cola hacia los valores de menor resolución (FWHM mayor). Esta distribución nos indica que la mayoría de casos la resolución estará alrededor de las máximas frecuencias del histograma que se ubican a valores de alta resolución (FWHM menor) pero que hay una gran cantidad de casos donde la atmósfera producirá una gran pérdida de resolución.

La Tabla 2 muestra los estadísticos básicos de la resolución (anchura FWHM de la LSF en unidades píxel) del patrón sintético tras apli-

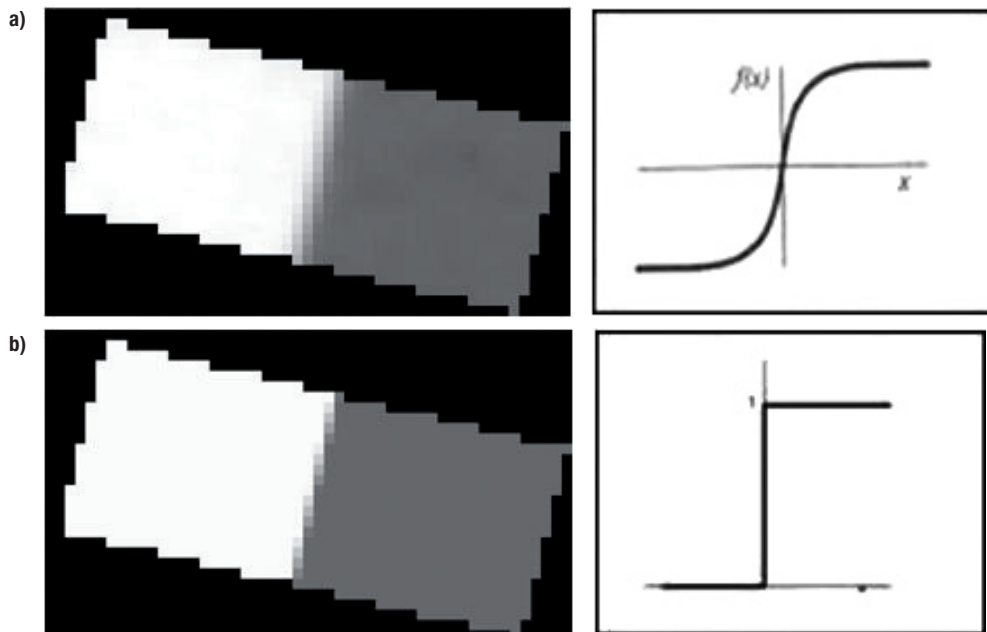


Figura 2. Detalle del escalón radiométrico del blanco radiométrico (a) empleado como ESF. Detalle de la imagen sintética del blanco radiométrico (b) empleado como patrón de la resolución.

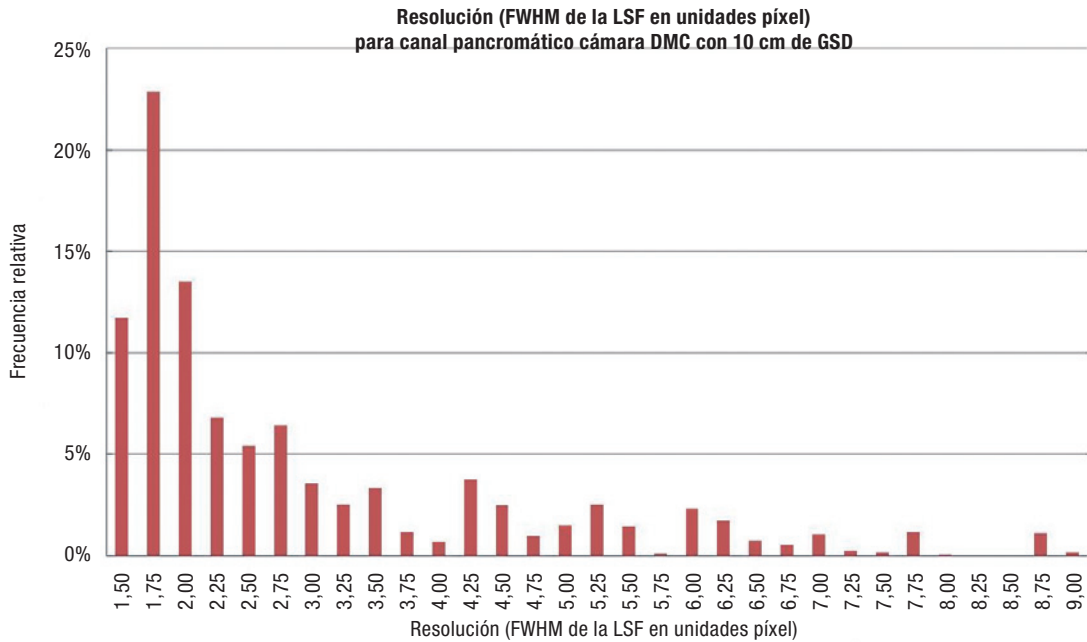


Figura 3. Histograma de la resolución (FWHM de la LSF en unidades píxel) del blanco radiométrico tipo escalón tras aplicar las simulaciones atmosféricas para canal pancromático.

car a la imagen todas las simulaciones atmosféricas para el canal pancromático de la DMC, tomando dicho patrón sintético (sin atmósfera) como referencia de resolución unidad, que confirman las apreciaciones realizadas sobre el histograma de la Figura 3.

Por su parte, la resolución medida en la imagen DMC pancromática sobre el blanco radiométrico y mediante la técnica descrita es 3,15 píxeles con GSD de 10cm, tomando dicho patrón sintético como referencia de resolución unidad. Ambos resultados son compatibles, puesto que la resolución perdida por el efecto atmosférico es una parte de la pérdida total y las condiciones atmosféricas reales están dentro de las consideradas en la simula-

Tabla 2. Estadísticos básicos de la resolución (unidades en píxeles y GSD de 10 cm) para el canal pancromático de la DMC

Resolución	Pancromático
Patrón	1,00
Mínima	8,81
Máxima	1,35
Promedio	2,81
Desviación estándar	1,66
Percentil Q1	1,62
Percentil Q2	2,07
Percentil Q3	3,37

ción. Análisis más detallados de los resultados de pérdida de resolución, muestran que las variables que más influyen en la pérdida de la misma son el tipo y la cantidad de aerosoles.

A continuación se repite el proceso para cada uno de los canales multiespectrales, para analizar si las diferencias son significativas respecto al canal pancromático. La Tabla 3 muestra los estadísticos básicos de la resolución del patrón sintético tras aplicar a la imagen todas las simulaciones atmosféricas para los canales multiespectrales de la DMC, tomando dicho patrón sintético como referencia de resolución unidad. Como puede observarse en dicha tabla existe una elevada dependencia con la longitud de onda, siendo máximo el efecto a longitudes de onda baja (azul).

Este comportamiento de la resolución para los canales multiespectrales refuerza el análisis anterior que relaciona los efectos de la atmósfera en la resolución con su carácter dispersivo y por tanto con el tipo y cantidad de aerosoles, dada la dependencia de la dispersión de la longitud de onda, como muestra las Tablas 4 y 5, donde se calculan los estadísticos básicos de la resolución para cada una de las atmósferas consideradas, así como cada una de

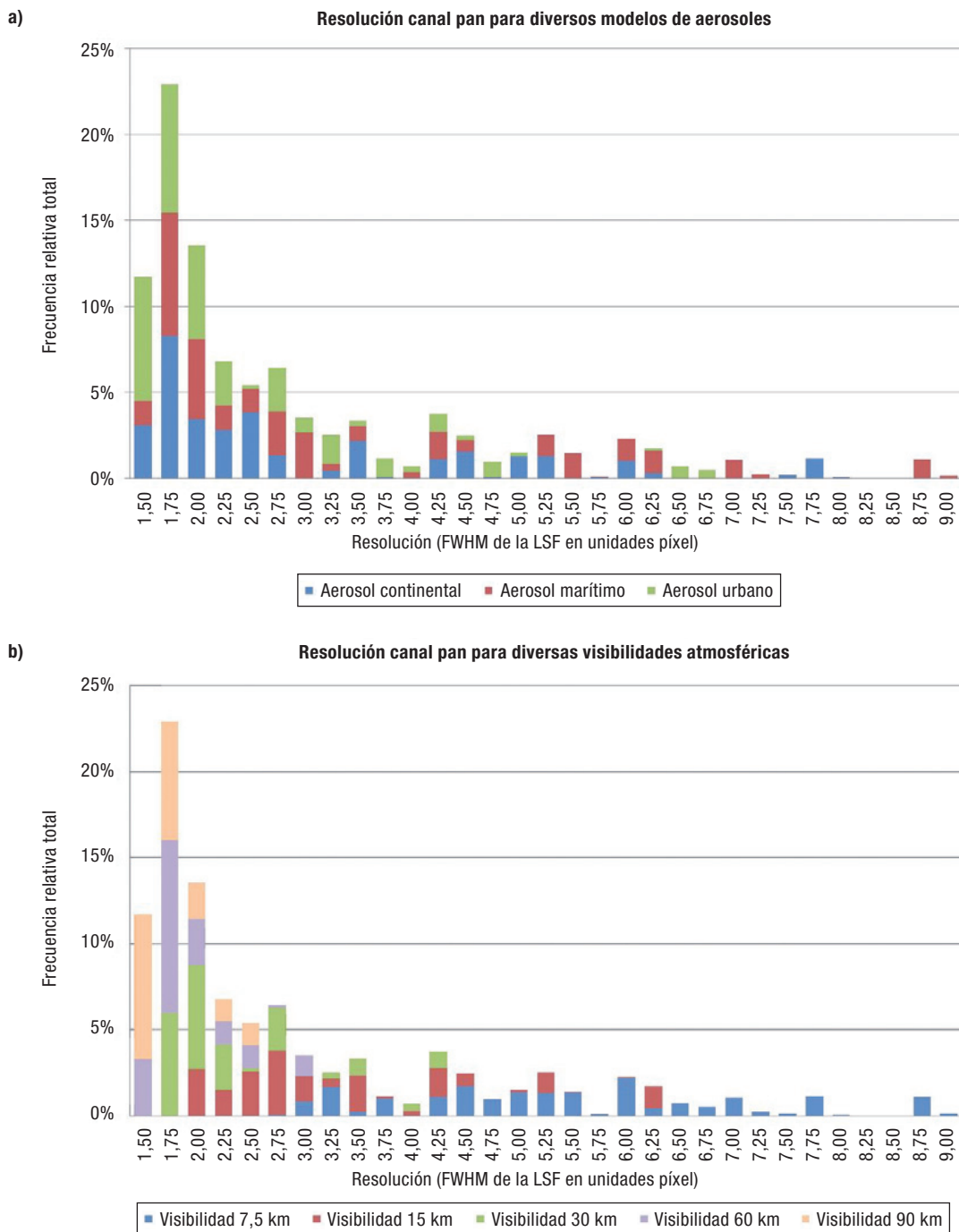


Figura 4. Histograma de la resolución (FWHM de la LSF en unidades píxel) del blanco radiométrico tipo escanón tras aplicar las simulaciones atmosféricas para canal pancromático. (a) según el modelo de aerosol considerado para las simulaciones atmosféricas (b) según la visibilidad atmosférica considerada para las simulaciones atmosféricas.

las visibilidades atmosféricas utilizadas para la simulación de la atmósfera.

Este hecho es claramente observable en la Figura 4, donde se ha procesado el histograma de la resolución para el caso pancromático para ha-

cer visible la frecuencia obtenida para cada tipo de atmósfera o para cada visibilidad atmosférica considerada en las simulaciones. Este fenómeno ya es claramente observable para el canal pancromático, por lo que se confirma que

Tabla 3. Estadísticos básicos de la resolución (unidades en píxeles y GSD de 10 cm) para los canales multiespectrales de la DMC

Resolución	Azul	Verde	Rojo	Infrarrojo próximo
Patrón	1,00	1,00	1,00	1,00
Mínima	13,55	9,03	8,53	8,03
Máxima	1,93	1,43	1,26	1,12
Promedio	5,34	3,16	2,51	1,97
Desviación estándar	3,03	1,83	1,56	1,24
Percentil Q1	2,74	1,74	1,46	1,27
Percentil Q2	4,79	2,43	1,76	1,47
Percentil Q3	7,56	4,14	2,84	2,02

Tabla 4. Estadísticos básicos de la resolución (unidades en píxeles y GSD de 10 cm) para el canal pancromático de la DMC según el modelo de aerosol considerado para las simulaciones atmosféricas

Resolución pancromático	Aerosol		
	Continental	Marítimo	Urbano
Patrón	1,00	1,00	1,00
Mínima	7,80	8,81	6,72
Máxima	1,42	1,47	1,35
Promedio	2,82	3,27	2,33
Desviación estándar	1,61	1,94	1,21
Percentil Q1	1,64	1,74	1,53
Percentil Q2	2,20	2,56	1,88
Percentil Q3	3,46	4,27	2,68

en alta frecuencia (azul) la influencia del tipo y cantidad de aerosol será claramente apreciable.

Como trabajo futuro se plantea analizar con estos procedimientos imágenes obtenidas de forma sincrónica con medidas de concentraciones de gases y aerosoles atmosféricos. De esta forma se podrán validar los resultados de resolución de las imágenes con las simulaciones específicas para las condiciones atmosféricas de adquisición.

Conclusiones

En este trabajo se ha combinado un método para medir la resolución de imágenes de la DMC (FWHM de la LSF en unidades píxel), con la generación de una imagen sintética y la aplicación de múltiples simulaciones atmosféricas. Los resultados de las simulaciones muestran una elevada dependencia con el tipo y cantidad de aerosol, y también son compatibles

Tabla 5. Estadísticos básicos de la resolución (unidades en píxeles y GSD de 10 cm) para el canal pancromático de la DMC según la visibilidad atmosférica considerada para las simulaciones atmosféricas

Resolución pancromático	Visibilidad				
	7,5 km	15 km	30 km	60 km	120 km
Patrón	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Mínima	8,81	6,23	4,14	2,93	2,40
Máxima	2,63	1,82	1,52	1,39	1,35
Promedio	5,30	3,17	2,17	1,78	1,65
Desviación estándar	1,58	1,19	0,67	0,38	0,26
Percentil Q1	4,24	2,28	1,72	1,53	1,45
Percentil Q2	5,18	2,71	1,89	1,63	1,52
Percentil Q3	6,35	4,03	2,52	1,95	1,74

con la medida de resolución de la imagen real del blanco con la cámara DMC. Como trabajo futuro se propone analizar con estos procedimientos imágenes obtenidas de forma síncrona con medidas de concentraciones de gases y aerosoles atmosféricos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CEDEX (Ministerio de Fomento) por su colaboración en las medidas de campo. Los autores también agradecen al Ajuntament de Banyoles por la cesión del Camp Vell para la instalación de blancos radiométricos.

Referencias

- BLONSKI, S. 2001. Spatial Resolution of IKONOS Pan. Images: Characterization Based on Edge Responses. In: *2001 High Spatial Resolution Commercial Imagery Workshop*, 19-22 Marzo, Greenbelt, MD (USA).
- BLONSKI, S., PAGNUTTI, M., RYAN, R. E. & ZANONI, V. 2002. In-flight edge response measurements for high spatial-resolution remote sensing systems. In: W. L. Barnes (ed.), *Proceedings of SPIE: Earth Observing Systems VII*, 4814: 317-326.
- RYAN, R., BALDRIDGE, B., SCHOWENGERDT, R. A., CHOIT, HELDER D. L. & BLONSKI, S. 2003. Ikonos spatial resolution and image interpretability characterization. *Remote Sensing of Environment*, 88: 37-52.
- KAUFMAN, Y. J. 1989. The atmospheric effect on remote sensing and its correction. In: Asrar, G., editor, *Theory and Applications of optical Remote Sensing*. Wiley and Sons, New York.
- SOLER, M. E., PÉREZ, L.F., PALÀ, V., & ARBIOL, R. 2007. *Experiencias en medidas de resolución de imagen en el ICC 7ª Semana Geomántica*. Barcelona, 20-23 febrero.
- STAENZ, K. & WILLIAMS, D. J. 1997. Retrieval of Surface Reflectance from Hyperpectral Data Using a Look-up Table Approach. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 23(4): 354-368.
- VERMOTE, E., TANRÉ, D., DEUZÉ, J. L., HERMAN, M. & MORCRETTE, J. J. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 35: 675-686.