

## Realce espacial de imágenes ASTER mediante cokrigeaje

Rigol-Sánchez, J. P.<sup>a</sup>; Pardo-Igúzquiza, E.<sup>b</sup>; Chica-Olmo, M.<sup>b</sup>; García-Soldado, M. J.<sup>b</sup>

<sup>(a)</sup> Dpto. de Geología, Lab. RSGIS – CEAMA. Universidad de Jaén.

Campus Universitario Las Lagunillas B-3. 23071, Jaén, España.

<sup>(b)</sup> Laboratorio RSGIS, Centro Andaluz de Medio Ambiente - CEAMA, Dpto. de Geodinámica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada.

Avda. Fuentenueva s/n, 18071, Granada, España.

### RESUMEN

Para utilizar de forma más efectiva las imágenes ASTER pueden emplearse distintas técnicas de fusión o realce espacial. El objetivo de este estudio es la aplicación del método de realce espacial de cokrigeaje a imágenes ASTER en el VIRP e IRM y comparar los resultados con los obtenidos con las técnicas basadas en IHS y ACP. Los resultados obtenidos para un sector piloto en Granada, España, indican que esta aproximación supera claramente a IHS y ACP desde el punto de vista espectral, aunque estos últimos consiguen incorporar eficazmente ciertos patrones y detalles espaciales.

Palabras claves: ASTER, fusión, cokrigeaje

### ABSTRACT

Several image fusion techniques are available for effective utilization of ASTER images. The main goal of this study was the application of the Downscaling Cokriging method for image sharpening to ASTER VNIR and SWIR images and to compare these results with those obtained using HIS and PCA-based data fusion methods. Results obtained for a pilot area in Granada, Spain, suggest that the Cokriging approach produces more realistic sharpened images from a spectral point of view. Analysed standard methods allow however to incorporate effectively spatial patterns at fine spatial scales.

Keywords: ASTER, image fusion, Cokriging

### Introducción

En la actualidad, la mayoría de los sensores multiespectrales de observación de la Tierra situados en satélites, tales como HRV, ETM+, Ikonos o Quickbird, proporcionan, por cuestiones de diseño, imágenes de tipo pancromático con alta resolución espacial e imágenes multiespectrales con menor resolución espacial pero con mayor resolución espectral.

A éstos se ha sumado el sensor multiespectral de alta resolución ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), a bordo del satélite Terra lanzado en diciembre de 1999. Este sensor no incluye, sin embargo, una banda pancromática sino que dispone de tres bandas espectrales en la región del visible y el infrarrojo próximo (VIRP; 0.5-1.0 $\mu$ m) con alta resolución espacial (15m), así

como seis bandas en el infrarrojo medio (IRM; 1.0-2.5  $\mu$ m) con resolución espacial media (30m) y cuatro bandas en el infrarrojo térmico (IRT; 8.0-12.0  $\mu$ m) con baja resolución espacial (90m) (Yamaguchi et al., 1998).

Para utilizar de forma más efectiva todas estas imágenes pueden emplearse técnicas de fusión que permiten combinar las imágenes de alta resolución espacial (normalmente pancromáticas) con las multiespectrales de menor resolución espacial en una única imagen integrada (Chavez et al., 1991).

La fusión de imágenes de satélite pancromáticas de alta resolución e imágenes multiespectrales de baja resolución es un tema importante en muchas aplicaciones cartográficas y de tele-detección. El objetivo de la fusión es integrar

las imágenes adquiridas a diferentes resoluciones o por diferentes sensores para obtener más información de la que puede ser obtenida de una única imagen individualmente (Pohl et al., 1998). Las técnicas de fusión persiguen por tanto la integración de información complementaria y redundante a partir de múltiples imágenes para crear una imagen compuesta que contenga una mejor descripción de la escena (Saraf, 1999). En teledetección son múltiples las situaciones en las que se requieren simultáneamente alta resolución espacial y alta resolución espectral en una imagen individual. Así, los beneficios o ventajas de la fusión de imágenes ha sido demostrada en muchas aplicaciones prácticas tales como estudios de análisis urbano, vegetación, geología, usos del suelo o agricultura.

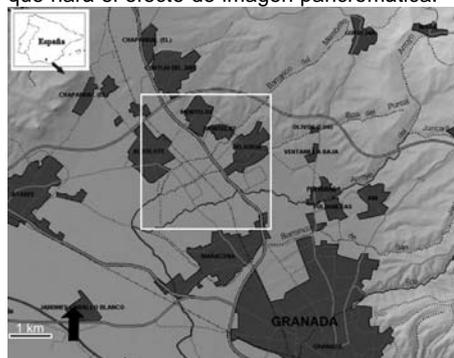
En los últimos años se han diseñado numerosas técnicas de fusión de imágenes de distinta resolución, entre las que cabe destacar: Intensidad-Tono-Saturación (IHS, en su acrónimo en inglés), Análisis de Componentes Principales (ACP), filtro de paso alto (HPF, en su acrónimo en inglés) (Chavez et al., 1991), predicción por regresión (Price, 1999), ARSIS (Ranchin et al., 2003), y distintas variaciones de la transformación *wavelet* (Nuñez et al., 1999; Simone et al., 2002), entre otras.

Los problemas y limitaciones asociados a las distintas técnicas de fusión han sido analizados en distintos estudios (Chavez et al., 1991; Pellemans et al., 1993; Rigol et al., 1998). De acuerdo con esos estudios, el problema más importante es que la imagen fusionada normalmente presenta una desviación notable en la apariencia visual y en los valores espectrales de la imagen original. Estas distorsiones afectan a la subsiguiente interpretación, especialmente cuando el rango de longitudes de onda de la imagen pancromática no se corresponde con el de la imagen multiespectral (Zhang, 2002; Ling et al., 2007). En la fusión de imágenes es deseable minimizar la distorsión del color ya que eso asegura que los objetos separables en la imagen multiespectral original son aún separables en la imagen fusionada (Chavez et al., 1991).

Entre los métodos de integración existentes, los más utilizados en teledetección son posiblemente los basados en IHS y en ACP. Estas técnicas se han utilizado con éxito en la fusión de imágenes SPOT pancromáticas con imágenes Landsat TM u otras imágenes multiespectrales. En la fusión de imágenes de nueva generación tales como ETM+, Ikonos o Quickbird, la extensión de la longitud de onda de la banda pancromática en el infrarrojo próximo (lo que produce que no haya solapamiento espectral entre la

banda pancromática y las bandas multiespectrales) puede resultar en una distorsión del color significativa en la imagen fusionada cuando se utilizan los métodos IHS y ACP (Zhang, 2002; Ling et al., 2007).

El objetivo de este estudio es presentar la aplicación del método de realce espacial mediante fusión con cokrigeaje a imágenes ASTER en el VIRP e IRM y comparar los resultados con los obtenidos con dos de las técnicas más utilizadas en este ámbito, IHS y ACP. Así, para realzar espacialmente una imagen en el IRM (30m) se propone utilizar como imagen de alta resolución espacial (15m) una imagen intensidad derivada de la transformación de componentes principales de las tres bandas ASTER en el VIRP que hará el efecto de imagen pancromática.



**Fig. 1.** Situación del área de estudio en la Vega de Granada, España. En el borde inferior se sitúa la ciudad de Granada. El cuadrado blanco muestra el sector piloto de 3.84x3.84km<sup>2</sup>.

No obstante, en el realce de imágenes que se plantea en este trabajo, se tiene interés no sólo en tener una imagen visualmente satisfactoria que revele más detalles, sino que los detalles deben corresponderse con objetos reales y no con objetos espurios. Si el objetivo del proceso de realce fuese sólo mejorar la calidad visual de la imagen entonces el método IHS puede ser suficiente (véase por ejemplo, Pellemans et al., 1993).

### Área de estudio e imágenes

El área de estudio está situada en las proximidades de la ciudad de Granada (España) (Fig. 1). Para este estudio se ha seleccionado un sector piloto de 3.84x3.84km<sup>2</sup> dentro de la Vega de Granada que incluye a las localidades de Peligros, Albolote y, parcialmente, Maracena. La Vega de Granada se sitúa en una zona topográ-

ficamente llana sobre la cuenca de Granada y es una zona de gran interés medioambiental, en la que se desarrolla una intensa actividad socioeconómica, agrícola, industrial y urbanística. Los usos del suelo principales están relacionados con esas actividades e incluyen: núcleos urbanos, solares, zonas residenciales con casas y jardines; carreteras asfaltadas y caminos de tierra; polígonos industriales con aparcamientos y naves de distintos tipos; cultivos diversos y parcelas en barbecho; entre otros.



**Fig. 2.** Imagen de la componente principal 1 de las tres bandas ASTER en el VIRP (15m) del sector piloto indicado en la Fig. 1. Esta imagen se utiliza como imagen intensidad de alta resolución espacial.

En el estudio se utilizó una imagen ASTER de verano del sector piloto georreferenciada al sistema de coordenadas UTM con datum WGS84 (Fig. 2). Para realizar el estudio se remuestrearon las bandas en el IRM a un tamaño de píxel común de 15m (Fig. 3). Como imagen de alta resolución espacial se utilizó una imagen intensidad con resolución 15m obtenida por transformación de componentes principales de las tres bandas ASTER en el VIRP, correspondiente al componente principal 1 (Fig. 2).



**Fig. 3.** Imagen ASTER de la banda 6 remuestreada a 15m.

### Metodología

La teoría general del cokrigeaje ordinario ha sido descrita en distintos trabajos (p.e., Journel et al., 1978; Isaaks et al., 1989; Goovaerts, 1997) y la adaptada a teledetección en Atkinson et al. (1992, 1994). En este estudio, en contraste con las referencias previas en las que el soporte (término asimilable al tamaño de píxel) a estimar es igual o mayor que el de la imagen experimental, se utiliza un sistema de cokrigeaje para la fusión de imágenes de distinta resolución en la que el soporte de la imagen a estimar es igual o menor que el soporte de la imagen auxiliar. Las bases de este sistema se desarrollan en Pardo-Iguzquiza et al. (2006), por lo que aquí se presenta una síntesis resumida.

En esta aproximación, la imagen de alta resolución espacial cokrigada para la banda espectral  $k$  calculada a partir de una imagen de baja resolución espacial (de la banda espectral  $k$ ) y una imagen de alta resolución espacial (de una banda espectral diferente) viene dada por:

$$\hat{z}_u^k(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i^0 Z_V^k(\mathbf{x}_i) + \sum_{j=1}^M \beta_j^0 Z_u^\lambda(\mathbf{x}_j) \quad (1)$$

donde:

$\hat{Z}_u^k(\mathbf{x}_0)$ : es la función aleatoria (FA) del píxel de área  $u$ , con coordenadas  $\mathbf{x}_0 = \{x_1, x_2\}$  de la banda espectral  $k$  estimada con cokrigeaje.

$Z_V^k(\mathbf{x}_i)$ : es la función aleatoria del píxel de la imagen de baja resolución espacial con área  $V$  de la banda espectral  $k$ . Se utilizan  $N$  píxeles. Por ejemplo, una ventana de  $N=3 \times 3$  píxeles. El peso asignado a la variable aleatoria del píxel  $i$  es  $\lambda_i^0$ .

$Z_u^\lambda(\mathbf{x}_j)$ : es la función aleatoria del píxel de la imagen de alta resolución espacial con área  $u$  de la banda espectral  $\lambda$ . Se utilizan  $M$  píxeles. Por ejemplo, una ventana de  $M=5 \times 5$  píxeles. El peso asignado a la variable aleatoria del píxel  $j$  es  $\beta_j^0$ .

El objetivo del cokrigeaje es obtener dos conjuntos de pesos,  $\{\lambda_i^0; i=1, \dots, N\}$  y  $\{\beta_j^0; j=1, \dots, M\}$ , que sean óptimos en el sentido de proporcionar un estimador insesgado y con varianza de estimación mínima. Puede observarse que la ecuación (1) puede ser interpretada como dos medias móviles ponderadas de las imágenes de baja y alta resolución espacial. Así, el sistema de cokrigeaje es asimilable a la aplicación de un filtro de paso bajo a la ima-

gen de baja resolución espacial y un filtro de paso alto a la imagen de alta resolución espacial, y a la suma de las imágenes filtradas:

$$\hat{Z}_u^k(\mathbf{x}_0) = \mathbf{L}[Z_V^k(\mathbf{x}_i)] + \mathbf{H}[Z_u^\lambda(\mathbf{x}_j)] \quad (2)$$

donde:

$\mathbf{L}[\cdot]$  : es el filtro de paso bajo.

$\mathbf{H}[\cdot]$  : es el filtro de paso alto.

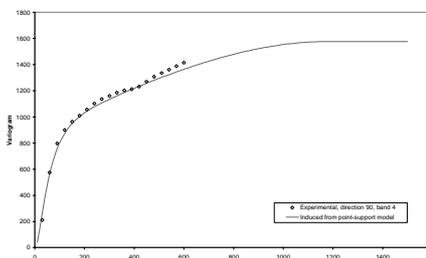
Los filtros de cokrigaje tienen en cuenta el efecto de soporte (es decir, el efecto del tamaño de los píxeles) y las covarianzas cruzadas de las imágenes lo que implica una interacción implícita entre los filtros de paso bajo y paso alto y la evaluación de su importancia relativa. Hay que destacar que los pesos de los filtros en el cokrigaje se obtienen por criterios estadísticos a partir de los datos, mientras que en otros métodos como HPF los pesos se escogen a criterio del analista.

### Aplicación y resultados

Los pasos realizados para obtener la imagen del IRM a alta resolución espacial mediante cokrigaje fueron, de forma resumida:

- Estimación de los variogramas simples y cruzados con soporte de pixel de las imágenes experimentales.
- Estimación del modelo lineal de correogionalización de los variogramas simples y cruzados puntuales mediante deconvolución.
- Estimación de la imagen objetivo mediante cokrigaje donde cada variograma simple y cruzado necesario en el sistema de cokrigaje se obtuvo mediante deconvolución de los variogramas puntuales.

Los variogramas simples y cruzados experimentales fueron estimados y utilizados para seleccionar los potenciales modelos teóricos que pueden ser empleados. Por ejemplo, la Fig. 4 muestra el variograma experimental y ajustado de la banda 4 para la dirección NS. En todos los casos, tras una inspección visual con un programa gráfico de ajuste se realizaron buenos ajustes con dos estructuras: (1) modelo exponencial isótropo con alcance 50m y (2) modelo esférico anisótropo (ángulo 0° y anisotropía 1.1) con alcance 1300m.



**Fig. 4.** Ejemplo de variograma experimental y modelo teórico ajustado.

Para evaluar las estimaciones proporcionadas por el método de cokrigaje se realizó una comparación con las estimaciones proporcionadas por los métodos clásicos IHS y ACP. En las Fig. 5A, B y C se muestran las imágenes de la banda 6 realizadas mediante cokrigaje, IHS y ACP, respectivamente. Se aprecia que la calidad visual de las imágenes es comparable en los tres casos, aunque se detectan diferencias notables. Así, por ejemplo, en determinadas zonas en las que aparecen patrones urbanos, el detalle espacial que ofrecen los métodos IHS y ACP es superior al que ofrece el método de cokrigaje.



**Fig. 5A.** Imagen ASTER de la banda 6 realizada mediante cokrigaje.



**Fig. 5B.** Imagen ASTER de la banda 6 realizada mediante IHS.

No obstante, la imagen realzada con cokrigeaje es claramente más parecida espectralmente a la imagen original que las realzadas con IHS y ACP. Esto se aprecia claramente, por ejemplo, en la zona situada en la esquina inferior derecha del sector piloto (a la derecha de la carretera). Aunque, por claridad no se muestran, este efecto se aprecia igualmente de forma muy clara al examinar distintas composiciones de color de las imágenes realzadas. Esto sugiere que el método de cokrigeaje introduce muchas menos distorsiones de color.



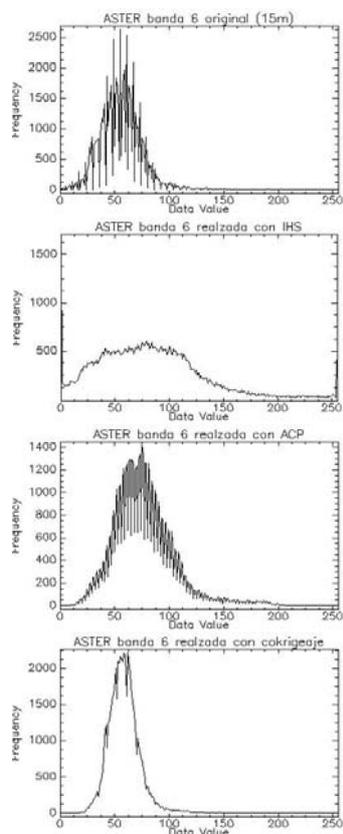
**Fig. 5C.** Imagen ASTER de la banda 6 realzada mediante ACP.

Para realizar una comparación cuantitativa entre las imágenes realzadas y las imágenes originales se utilizó el coeficiente de correlación. Aunque se han propuesto numerosos estadísticos para este fin (véase Pardo-Iguzquiza et al., 2006), el coeficiente de correlación estándar es posiblemente el más simple y efectivo. En la Tabla 1 se muestran los resultados de esta comparación. Como puede observarse el método de cokrigeaje es en este sentido clara y significativamente superior a los otros en la integración de imágenes ASTER. Así, los datos indican (para todas las bandas) que las correlaciones son superiores a 0.83 en el caso del cokrigeaje, mientras que para IHS y ACP las correlaciones no superan en ningún caso el valor de 0.76.

**Tabla 1.** Correlación entre bandas ASTER IRM realzadas y originales.

	Banda 8	Banda 6	Banda 4
IHS	0.758	0.760	0.726
ACP	0.728	0.722	0.755
CK	0.866	0.856	0.836

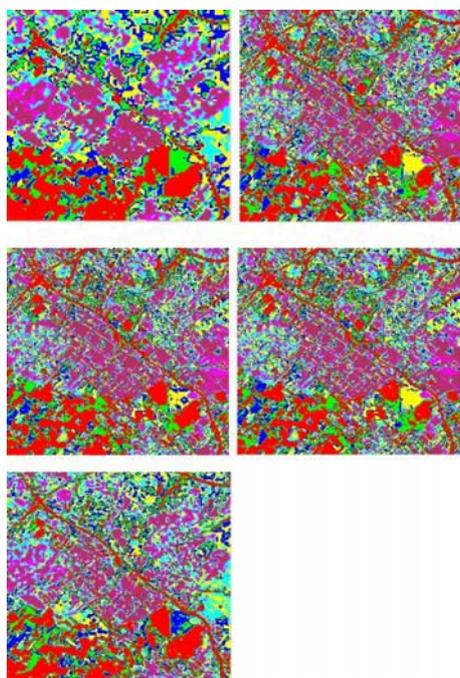
En la Fig. 6 se muestran los histogramas de la banda 6 original (remuestreada a 15m) y tras realizar los realces con IHS, ACP y cokrigeaje. La comparación visual de los histogramas indica que el histograma más parecido al original es el de la imagen integrada con cokrigeaje, mientras que el menos parecido es el obtenido con IHS. Esto sugiere también que el método de cokrigeaje es espectralmente superior al basado en ACP y, especialmente, al basado en IHS.



**Fig. 6.** Histogramas de la banda 6 ASTER, de arriba abajo: (a) original, realzada con (b) IHS, (c) ACP, (d) cokrigeaje.

Se realizaron asimismo diversos experimentos de clasificación con el objetivo de evaluar de forma conjunta la similitud espacial y espectral de las imágenes realzadas con las imágenes originales. La inspección de las imágenes clasificadas puede indicar si los mismos objetos (espectrales) se sitúan en los mismos luga-

res (localización espacial) en las distintas imágenes realzadas. En la Fig. 7 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos de una clasificación no supervisada mediante el algoritmo k-medias utilizando 7 clases. Se aprecia que la clasificación de la imagen realzada con cokrigaje es más parecida a la clasificación de la imagen original, mientras que las clasificaciones de las imágenes realzadas con IHS y ACP son más parecidas a la clasificación de la imagen intensidad de alta resolución espacial. Esto sugiere que los métodos de fusión estándar ponderan excesivamente en el proceso a la imagen de alta resolución espacial. Los resultados obtenidos son comparativamente similares a los obtenidos en los experimentos de clasificación supervisada.



**Fig. 7.** Resultados de la clasificación no supervisada mediante k-medias con 7 clases utilizando, de izquierda a derecha y de arriba a abajo: (a) las 6 bandas originales del IRM, (b) la imagen intensidad de alta resolución espacial, (c) las 6 bandas del IRM realzadas con IHS, (d) con ACP y (e) con cokrigaje.

### Conclusiones

En el presente trabajo se ha aplicado el método geoestadístico de realce espacial de imágenes

de teledetección de cokrigaje a una imagen ASTER de la zona periurbana de Granada. Las imágenes ASTER disponen de tres conjuntos de bandas con distintas características de resolución pero no proporcionan una imagen pancromática. Para realzar espacialmente las imágenes en el IRM se puede optar por utilizar una banda específica en el VIRP con resolución de 15m o bien por utilizar una banda sintética obtenida de las bandas en el VIRP. En este trabajo se ha optado por seguir la segunda estrategia, más lógica, y utilizar una imagen intensidad obtenida mediante una transformación de componentes principales.

Los resultados de la integración de imágenes obtenidos con cokrigaje, cuando se comparan con los obtenidos con otros métodos de fusión de imágenes estándar, indican que esta aproximación presenta tanto ventajas como ciertas limitaciones. Así, el método de cokrigaje es claramente superior a los métodos IHS y ACP desde el punto de vista espectral, ya que las imágenes realzadas son más parecidas a las imágenes originales. En este sentido los métodos estándar introducen más distorsiones en el color, es decir, en los valores espectrales de las imágenes realzadas al ponderar excesivamente la imagen de alta resolución espacial, como ha quedado de manifiesto en los análisis tanto visuales como cuantitativos realizados. No obstante, los métodos estándar son capaces de capturar mejor los detalles espaciales en ciertas zonas que presentan patrones específicos, como es el caso del reticulado a escalas finas de las zonas urbanas, aunque estos detalles pueden corresponder a objetos espectrales espurios heredados de la imagen de alta resolución espacial.

Es de suponer que el método propuesto presente especialmente buenos resultados cuando se aplique a la fusión de imágenes en rangos espectrales muy distintos, siempre que mantengan un cierto grado de correlación espacial. Este aspecto queda abierto a futuras investigaciones.

### Agradecimientos

El coautor Eulogio Pardo, es contratado Ramón y Cajal del MEC, perteneciente al Laboratorio RSGIS «Teledetección, SIG y Geoestadística» de la Universidad de Granada. El trabajo se ha desarrollado con la financiación del Proyecto *EIGEO* CGL2006-06845/CLI del Ministerio de Ciencia y Tecnología de España y de la Junta de Andalucía (grupo de investigación RNM122).

## Referencias

- Atkinson, P.M., Webster, R., Curran P.J. 1992. Cokriging with ground based radiometry. *Remote Sensing of Environment*, 41, 45-60.
- Atkinson, P.M., Webster, R., Curran, P.J. 1994. Cokriging with airborne MSS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 50, 335-345.
- Chavez, S., Sides, S.C., Anderson, J.A. 1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT Panchromatic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(3), 295-303.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York: Oxford University Press.
- laaks E.H., Srisvastava R.M. 1989. *Applied Geostatistics*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Journel A.G., Huijbregts, Ch. J. 1978. *Mining Geostatistics*. New-York: Academic Press.
- Ling, Y. R., Ehlers, M., Usery, E. L., Madden, M. 2007. FFT-enhanced IHS transform method for fusing high-resolution satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61 (6): 381-392.
- Núñez, J., Otazu, X., Fors, O., Prades, A., Pala V., Arbiol, R. 1999. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37 (3), 1204-1211.
- Pardo-Iguzquiza, E., Chica-Olmo, M., Atkinson, P. M. 2006. Downscaling cokriging for image sharpening. *Remote Sensing of Environment*, 102(1-2), 86-98.
- Pellemans, A.H.J.M, Jordans, R.W., Allewijn, R. 1993. Merging multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 59 (1), 81-87.
- Pohl, C., van Genderen, J.L. 1998. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (5): 823-854.
- Price, J.C. 1999. Combining multispectral data of different spatial resolution. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 37 (3), 1199-1203.
- Ranchin, T., Aiazzi, B., Alparone, L., Baronti S., Wald, L. 2003. Image fusion-the ARSIS concept and some successful implementation schemes. *Photogrammetry & Remote Sensing*, 58, 4-18.
- Rigol, J. P., Chica-Olmo, M. 1998. Merging Remote Sensing Images for Geological-Environmental Mapping: Application to the Cabo de Gata-Nijar Natural Park, Spain. *Environmental Geology*, 34(2/3), 194-202.
- Saraf, A. K. 1999. IRS-1C-LISS-III and PAN data fusion: An approach to improve remote sensing based mapping techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 20(10), 1929-1934.
- Yamaguchi, Y., Kahle, A., Tsu, H., Kawakami, T., Priel, M. 1998. Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5): 1062-1071.
- Zhang, Y. 2002. Problems in the fusion of commercial high-resolution satellite images as well as Landsat 7 images and initial solutions. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34(4).