

MÉTODO GEOESTADÍSTICO PARA MEJORA DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE IMÁGENES DE INFRARROJO TÉRMICO

E. Pardo-Igúzquiza (*), M. Chica-Olmo (*), V. F. Rodríguez-Galiano (*), M. J. García-Soldado (*),
J. P. Rigol Sánchez (**) y S. M. Pérez-López (*).

(*) Universidad de Granada. Departamento de Geodinámica /CEAMA. Campus Fuentenueva,
18071 Granada, mchica@ugr.es

(**) Universidad de Jaén. Departamento de Geología/CEAMA, Campus Las Lagunillas B-3, 23071 Jaén.

RESUMEN

En teledetección es cada vez más frecuente el uso de imágenes de infrarrojo térmico (IRt) en aplicaciones medioambientales; aunque debido a razones físicas bien conocidas la resolución espacial de la información radiométrica térmica es menor que la del resto de bandas registradas por el mismo sensor (visible, infrarrojos próximo y medio, pancromática). Desde el punto de vista estadístico, se constata experimentalmente que la correlación entre los datos IRt y el resto de las bandas de la imagen del sensor no suele ser alta, pero se ha comprobado que existe un patrón de variabilidad espacial (correlación) conjunta entre todas las bandas radiométricas que constituyen la imagen (corregionalización espacial radiométrica). Este factor (variogramas cruzados) junto con la estructura de variabilidad individual de cada banda (variogramas simples) representa el aspecto fundamental en el que se basa este trabajo. En el mismo, se presenta un método geoestadístico que permite mejorar la resolución espacial de una imagen IRt a partir de los datos originales de esta banda y de una o más bandas espectrales de la misma escena con mejor resolución espacial. Junto a los aspectos metodológicos se presentan los resultados de la aplicación a una imagen ETM+.

ABSTRACT

In remote sensing, it is increasing the use of thermal infrared images in environmental applications. However, for well known physical reasons, the spatial resolution of the thermal band is smaller than the rest of the spectral bands captured by the same sensor (visible, near and medium infrared and panchromatic bands). It is equally well known that the empirical correlation between the thermal infrared band and the rest of the spectral bands is usually low. Nevertheless, it can be shown that still there is a pattern of spatial variability (autocorrelation and cross-correlation) between the different spectral bands. This cross-correlation (quantified in terms of cross-variability by means of the cross-variogram), is the main foundation of the method presented in this work. The geostatistical method that is presented, allows to increase the spatial resolution of the thermal infrared band by using the experimental data from that band and the experimental data from one or more spectral bands with better spatial resolution. The methodology and results are illustrated with a case study using an ETM+ image.

Palabras clave: teledetección, fusión de imágenes, geoestadística, cokrigaje, variograma, soporte.

INTRODUCCIÓN

La banda del infrarrojo térmico (IRt) se ha utilizado en teledetección para la resolución de muchos problemas prácticos. Por ejemplo el estudio de rasgos tectónicos (Andre and Blodget, 1984), monitorización de actividad volcánica (Vaughan, 2005), detección de la temperatura y salinidad de la superficie del mar (Zhang *et al.*, 2004) y estudios climatológicos (Lunden and Nordberg, 1990) entre otras muchas aplicaciones. Es bien conocido que la imagen IRt monitoriza la energía emitida por la Tierra en el rango 8 a 15 μm , mientras que la energía solar reflejada para ese rango espectral es, en general, despreciable. La energía emitida por la Tierra está relacionada con la temperatura y la emisividad de los objetos o materiales en la

superficie. Este hecho, de que la imagen IRt monitorice un rango de longitudes de onda con un contenido energético muy bajo, hace que su resolución espacial sea baja al compararla con la resolución espacial de las otras bandas espectrales del mismo sensor. Por ejemplo, para el sensor ETM+, la banda IRt (banda 6) tiene una resolución espacial de 60 m, mientras que las otras seis bandas multiespectrales (bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7) tienen una resolución de 30 m y la banda pancromática (banda 8) tiene una resolución de 15 m. Es por lo tanto lógico, dentro del procesado de imágenes en teledetección, plantearse como objetivo el diseño de procedimientos para generar imágenes IRt con mejor resolución espacial pero conservando su contenido espectral. Uno de estos procedimientos es la fusión de la banda IRt con las otras bandas espectrales y con la banda pancromática. Diversos métodos se han

propuesto para llevar a cabo tal fusión, y el que se considera en este trabajo es el método geoestadístico de estimación multivariante conocido como cokrigaje. El cokrigaje presenta diversas ventajas como son: la consideración explícita de la correlación espacial de cada banda y la correlación cruzada de cada par de bandas, tiene en cuenta explícitamente el tamaño del píxel (*soporte de información* en lenguaje geoestadístico), así como la función de dispersión puntual (PSF: *Point Spread Function*) del sensor. Adicionalmente, el método tiene la propiedad de ser coherente; esto es, si la imagen de alta resolución obtenida por fusión se degrada utilizando el PSF del sensor, se obtiene una imagen idéntica a la imagen experimental obtenida por el sensor. La metodología de fusión de imágenes por cokrigaje se presenta resumidamente a continuación.

FUSIÓN DE IMÁGENES POR COKRIGEJAE

La imagen fusionada de alta resolución espacial obtenida por cokrigaje puede expresarse como una combinación lineal de las imágenes experimentales:

$$\hat{Z}_{u_0}^{k_0}(\mathbf{x}_0) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{n_j} \lambda_{ji}^0 Z_{u_j}^{k_j}(\mathbf{x}_i). \quad (1)$$

Donde:

$Z_a^b(\mathbf{x})$: representa el número digital (ND) de una imagen de satélite para la banda espectral b y con una resolución espacial (tamaño de pixel) a y para una localización espacial particular $\mathbf{x} = \{x, y\}$. El símbolo circunflejo sobre Z denota que es una imagen estimada o fusionada por cokrigaje, mientras que sin acento circunflejo denota que la imagen es experimental. Otras anotaciones son:

$b = k_0$, banda espectral cuya resolución espacial quiere ser mejorada.

$b = k_j$, banda espectral experimental incluida en el proceso de fusión por cokrigaje.

$a = u_0$, resolución espacial o tamaño de píxel de la imagen fusionada.

$b = u_j$, resolución espacial o tamaño de píxel de una imagen experimental utilizada en la fusión.

M , número de bandas experimentales utilizadas en la fusión.

n_j , número de píxeles de la vecindad utilizada para la imagen experimental de la banda espectral k_j .

Tipicamente, estas vecindades son ventanas móviles $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7$, etc.

λ_{ji}^0 , peso óptimo aplicado al ND $Z_{u_j}^{k_j}(\mathbf{x}_i)$ en la estimación del ND $Z_{u_0}^{k_0}(\mathbf{x}_0)$.

Los pesos óptimos anteriores se obtienen mediante la resolución de un sistema de ecuaciones lineales conocido como sistema de cokrigaje. Este sistema se obtiene imponiendo que el estimador sea insegado:

$$E\{\hat{Z}_{u_0}^{k_0}(\mathbf{x}_0) - Z_{u_0}^{k_0}(\mathbf{x}_0)\} = 0, \quad (2)$$

y minimizando la varianza de estimación

$$E\{\hat{Z}_{u_0}^{k_0}(\mathbf{x}_0) - Z_{u_0}^{k_0}(\mathbf{x}_0)\}^2 \rightarrow \text{mínimo}, \quad (3)$$

donde $E\{\cdot\}$ es el operador de esperanza matemática. El sistema de cokrigaje se puede representar en forma matricial como (4):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{u_0 u_1}^{k_0 k_1} & \cdots & \mathbf{C}_{u_0 u_M}^{k_0 k_M} & \mathbf{1}_{n_1} & \cdots & \mathbf{0}_{n_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_{u_M u_1}^{k_M k_1} & \cdots & \mathbf{C}_{u_M u_M}^{k_M k_M} & \mathbf{0}_{n_M} & \cdots & \mathbf{1}_{n_M} \\ \mathbf{1}_{n_1}^t & \cdots & \mathbf{0}_{n_M}^t & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_{n_1}^t & \cdots & \mathbf{1}_{n_M}^t & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_1^0 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\lambda}_M^0 \\ \mu_1 \\ \vdots \\ \mu_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{u_0 u_1}^{k_0 k_1} \\ \vdots \\ \mathbf{C}_{u_0 u_M}^{k_0 k_M} \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

Donde:

$\mathbf{C}_{u_i u_j}^{k_i k_j}$, matriz $(n_i \times n_j)$ de covarianza cruzada entre los n_i píxeles de la banda espectral k_i con resolución espacial u_i y los n_j píxeles de la banda espectral k_j con resolución espacial u_j . Es de notar que una covarianza directa es equivalente a la covarianza cruzada de una imagen consigo misma.

$\mathbf{1}_{n_i}^t : (1 \times n_i)$ vector de unos.

$\mathbf{0}_{n_i}^t : (1 \times n_i)$ vector de ceros.

El superíndice t denota vector transpuesto.

$\mu_k : (k=1, \dots, M)$ multiplicadores de Lagrange.

Todas las covarianzas cruzadas que aparecen en el lado derecho de la ecuación (4) no son accesibles, porque dependen de una imagen experimentalmente inexistente; esto es, la imagen que se quiere obtener por fusión con cokrigaje. Sin embargo, se puede efectuar una derivación teórica a partir de las imágenes experimentales, utilizando la teoría de procesos lineales (Papoulis, 1984) y un proceso de deconvolución numérica (Pardo-Igúzquiza *et al.*, 2006). Por ejemplo, se tiene para la banda 6 de ETM+ (imagen IRT):

$$C_{vv}^{66}(\mathbf{s}) = C_{\bullet\bullet}^{66}(\mathbf{s}) * h_v(\mathbf{s}) * h_v(-\mathbf{s}), \quad (5)$$

Donde

* : operador de convolución.

$C_{\bullet\bullet}^{66}(\mathbf{s})$: covarianza de la banda 6 con soporte (tamaño de píxel) puntual. Esto es, un píxel infinitesimal que se utiliza como modelo teórico.

$h_v(\mathbf{s})$: PSF del sensor. Por ejemplo, un PSF sencillo es:

$$h_v(\mathbf{s}) = \begin{cases} \frac{1}{V} & \text{if } \mathbf{s} \in V \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

pero cualquier otro PSF, como por ejemplo el gausiano, puede ser considerado.

El propósito de la ecuación (5) es estimar $C_{vv}^{66}(\mathbf{s})$ utilizando un procedimiento de deconvolución numérica. Este procedimiento consiste en proponer modelos para $C_{\bullet\bullet}^{66}(\mathbf{s})$, los cuales introducidos en la ecuación (5) producen un modelo inducido $\hat{C}_{vv}^{66}(\mathbf{s})$ el cual se puede comparar con la covarianza experimental $\hat{C}_{vv}^{66}(\mathbf{s})$ (la covarianza y variograma son funciones geoestadísticas equivalentes, por la relación: variograma es igual a varianza menos covarianza). La comparación se efectúa a través de una función de bondad de ajuste del tipo de mínimos cuadrados ponderados. Finalmente, se acepta como modelo estimado aquél que minimiza la función de ajuste.

Una vez obtenido el modelo con soporte puntual $C_{\bullet\bullet}^{66}(\mathbf{s})$, cualquier otra covarianza se puede obtener por convolución. Por ejemplo:

$$C_{uv}^{66}(\mathbf{s}) = C_{\bullet\bullet}^{66}(\mathbf{s}) * h_u(\mathbf{s}) * h_v(-\mathbf{s}), \quad (7)$$

Ahora, todos los términos del lado derecho son conocidos. Expresiones similares a la ecuación (5) existen para las covarianzas del resto de las bandas, así como para las covarianzas cruzadas entre parejas de bandas espectrales.

CASO DE ESTUDIO

El objetivo es simple, la obtención de una imagen IRt (banda 6 del sensor ETM+) con resolución espacial de 15 m utilizando estimación por cokrigaje. El área de estudio es una pequeña zona en Saskatchewan (Canadá). Las imágenes

disponibles son las bandas multiespectrales 1, 2, 3, 4, 5 y 7 con resolución de 30 m, así como la banda 8 pancromática con resolución espacial de 15 m y la banda 6 de IRt con resolución espacial de 60 m. Por consiguiente, el objetivo es pasar de una imagen IRt con resolución espacial de 60 m a una imagen IRt con 15 m de resolución espacial utilizando las bandas espectrales anteriores. Hay que tener en cuenta, como ocurre en regresión múltiple, que no por incluir más bandas en el proceso de fusión se obtienen mejores resultados. Particularmente, la información espectral de las bandas 2, 3 y 4 está contenida conjuntamente en la banda pancromática 8, mientras que esta última tiene una mejor resolución espacial. Por tanto, como ilustración se utiliza la IRt de baja resolución y la banda 8 pancromática.

La Figura 1 (superior) representa el variograma de la banda IRt y la Figura 1(inferior) muestra el variograma cruzado entre las bandas IRt y pancromática. En dichas figuras también se han representado los modelos inducidos por los modelos puntuales ajustados mediante la aplicación del procedimiento de deconvolución-convolución previamente descrito. Un modelo lineal de corregralización se ha adoptado con el fin de obtener un conjunto autorizado de variogramas y variogramas cruzados. Con dichos modelos se establece el sistema de cokrigaje para obtener la imagen IRt fusionada por cokrigaje. La figura 2 (superior) muestra un detalle de la imagen IRt experimental de baja resolución (60 m) y la imagen IRt de alta resolución (15 m) obtenida por cokrigaje se muestra en la Figura 2 (inferior). La imagen fusionada presenta la propiedad de coherencia, así como unas características estadísticas que derivan del decrecimiento del soporte (píxel) como son, media constante, la varianza se incrementa, el histograma tiene forma similar pero con mayor varianza y el variograma es menos continuo.

CONCLUSIONES

El cokrigaje es un método de interpolación con un fundamento geoestadístico preciso para incrementar la resolución espacial de bandas espectrales con baja resolución espacial, a partir de dichas bandas y otras bandas espectrales diferentes pero con mejor resolución espacial. Se ha presentado en este trabajo la aplicación de cokrigaje para el caso de una imagen IRt del sensor ETM+, que suele tener una correlación baja con las otras bandas espectrales. El Cokrigaje proporciona una imagen fusionada perfectamente coherente y, de acuerdo con Pardo-Igúzquiza et al. (2006), la imagen IRt fusionada por cokrigaje se puede considerar como

una mejora con respecto a la imagen IRT de baja resolución, en el sentido de tener una mejor resolución espacial pero conservando su contenido espectral, lo que avala su uso en aplicaciones medioambientales.

BIBLIOGRAFÍA

- Andre C. G. and Blodget, H. W., 1984. Thermal infrared satellite data for the study of tectonic features. *Geophysical Research Letters*, 11, 983-986.
- Lunden B. and Nordberg, M.-L., 1990. The first night-time Landsat satellite thermal infrared imagery over Sweden. *Geografiska Annaler*, 72 A , 1-12.
- Papoulis, A., 1984. Probability, random variables and stochastic processes. 2nd Edition, Singapore, McGraw-Hill International Editions.
- Pardo-Iguzquiza, E., Chica-Olmo, M. and Atkinson, P. M., 2006. Downscaling cokriging for image sharpening. *Remote Sensing of Environment*, 102, 86-98.
- Vaughan, R. G., 2005. Remotely monitoring volcanic activity at Mount St. Helens with thermal infrared data. Geological Society of America 2005. *Salt Lake City Annual Meeting*. Abstracts with Programs, 37, p. 108.

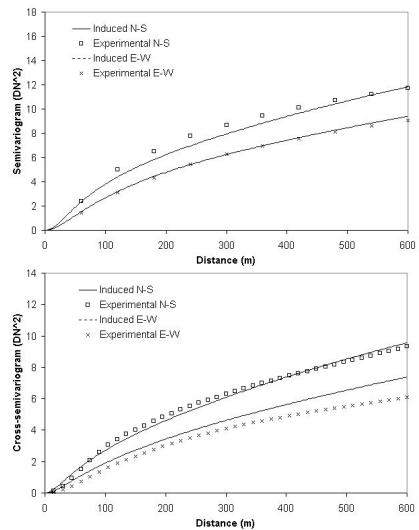


Figura 1. Superior: Variograma direccional experimental de la banda IRT y modelos inducidos por los modelos puntuales ajustados. Inferior: como en la imagen superior pero para el variograma cruzado entre las bandas IRT y pancromática.

Zhang B., Zhang, Y., Song, K. and Zhang, B., 2004. Detection of sea surface temperature (SST) and salinity using thermal infrared data of AVHRR and MODIS in the Gulf of Bohai sea of China. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 25 , 129-137

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el soporte económico del Ministerio de Ciencia e Innovación con cargo al Proyecto CGL2006-06845/CLI) y a la Junta de Andalucía (Grupo RNM122). Las imágenes utilizadas corresponden a las imágenes Landsat 7 Level 1-G suministrada por el Centro de Teledetección de Canadá.

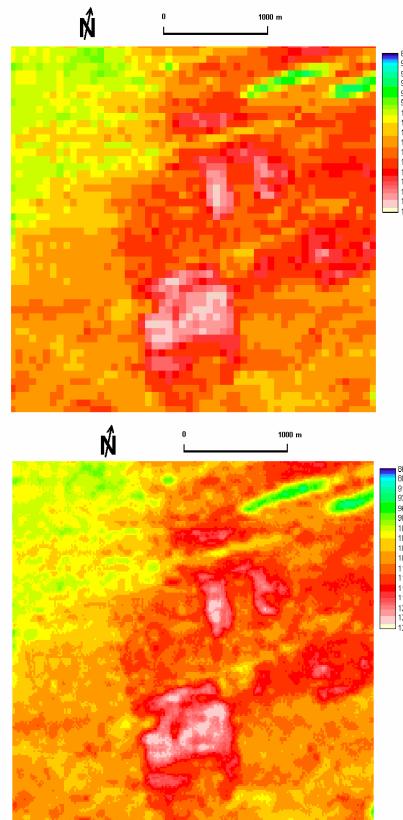


Figura 2. Superior: detalle de la imagen original IRT a baja resolución. Inferior: detalle de la imagen IRT con alta resolución obtenida por cokrigaje.