

Aplicación de la función variograma al análisis de cambios espacio-temporales en imágenes Landsat TM

M. Chica-Olmo¹, J.P. Ruiz-Castellano¹ y J.P. Rigol-Sánchez
mchica@ugr.es

¹ Universidad de Granada. Dpto. Geodinámica/CEAMA. Laboratorio RSGIS "Teledetección, SIG y Geoestadística". Avda. Fuentenueva s/n. 18071-Granada

² Universidad de Jaén. Dpto. Geología/CEAMA. Laboratorio RSGIS "Teledetección, SIG y Geoestadística". Campus Universitario Las Lagunillas, B3. 23071-Jaén

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología geoestadística basada en el análisis variográfico aplicado al estudio de cambios espacio-temporales en imágenes Landsat TM. El método utiliza la función variograma pseudo-cruzado para cuantificar las diferencias (cambios) espaciales de los valores digitales de las dos imágenes comparadas. La metodología consta de una etapa inicial de corrección geométrica y radiométrica de las imágenes, a efectos de facilitar el análisis comparativo posterior de las mismas. A partir de estas imágenes, se calcula la función variograma pseudo-cruzado en un contexto de vecindad local, aplicando según el caso de estudio distintos tamaños de ventana, 3x3, 5x5 píxeles, etc. De esta forma, para cada pareja de bandas espectrales comparadas o de sus transformadas (componentes principales, NDVI) se obtiene una imagen de co-textura que refleja los cambios ocurridos en el área de estudio.

En el texto se recogen tanto los aspectos metodológicos como su aplicación a un sector piloto localizado al noroeste de la ciudad de Granada, para el que se disponen de un conjunto de imágenes Landsat TM. Esta región es particularmente interesante por presentar un gran dinamismo en los cambios de uso del suelo, particularmente ligado a la expansión del suelo urbano a costa del uso tradicional agrícola.

PALABRAS CLAVE: teledetección, geoestadística, detección de cambios, co-textura, variograma pseudo-cruzado.

ABSTRACT

In this paper we are presenting a geostatistical methodology, based on variographical analysis, for studying spatio-temporal changes in Landsat TM imagery. The method uses the pseudo-cross variogram as a statistical function for quantifying the spatial changes in the digital values of two different images. The first step of the method is a geometrical correction and a radiometric calibration of the images in order that they can be directly compared. From the corrected and calibrated images, a pseudo-cross variogram is calculated by using a moving window with variable width (3x3, 5x5 pixels, etc). In this way, for each pair of images (or derived images as PCA components, NDVI, etc.) one obtains an image of co-texture which describes the changes in the study area represented by the images. The method is outlined in the paper together with an example of application using Landsat TM images from a study area located in the northwest of the city of Granada (Spain). The study area is very dynamical with respect to land use given to the fact of the expansion of urban development in the countryside.

KEY WORDS: remote sensing, geostatistics, change detection, co-texture, pseudo-cross variogram.

INTRODUCTION

Es bien patente que durante las últimas décadas se ha producido una crisis en el desarrollo socioeconómico de una parte importante de las áreas rurales, que en muchos casos ha sido causa de una transformación importante de estos espacios. Este proceso de transformación, que afecta esencialmente al uso del suelo, es aún más notorio en las áreas

periurbanas, donde el proceso de expansión urbana hace difícil compatibilizar el uso del suelo de estas regiones, que siendo eminentemente agrícolas se ven fuertemente influenciadas por los espacios urbanos limítrofes.

Este es el caso que desde hace años viene dándose en la Vega de Granada; espacio geográfico con gran valor socioeconómico en el que, históricamente, la rica agricultura desarrollada en su fértil suelo

ha vertebrado su estructura territorial. Sin embargo, el rápido crecimiento urbano de la ciudad de Granada, y de sus aglomeraciones periurbanas e industriales a partir de los años 80, ha provocado una rápida transformación de los espacios tradicionalmente agrarios, poniendo en peligro el desarrollo sostenible. Por tanto, se hace necesaria una planificación territorial que controle el crecimiento urbano para garantizar la pervivencia de los espacios rurales dado su valor productivo, paisajístico, cultural y ambiental (Martín-Vivaldi y Jiménez, 1995; Menor, 2000).

En este contexto de análisis de los procesos de transformación territorial, es evidente que la componente temporal adquiere una dimensión de especial relevancia. En tal sentido, la teledetección nos ofrece una visión sinóptica de la cubierta terrestre a través de las imágenes de satélite, constituyendo hoy día una fuente de información indispensable para el estudio de cambios producidos en el medio ambiente, al tratarse de información tomada de forma repetitiva sobre el mismo espacio. La detección de cambios en una superficie geográfica a partir de imágenes obtenidas en fechas distintas, se hace a través de la aplicación de algoritmos que, en esencia, producen una imagen (o multi-imagen) en la que pueden analizarse los cambios observados. Esta imagen resultante debe ser analizada para determinar e interpretar los cambios producidos en las diversas cubiertas temáticas, o bien en el seguimiento de algún proceso natural (desertización) o antrópico (urbanización). Las metodologías utilizadas en el análisis de detección de cambios son variadas, algunas de ellas pueden verse en Singh (1989), Chuvieco (1998) y Mas (1999).

El método aquí propuesto aborda esta problemática del cambio desde la creación de imágenes de co-textura a partir de una función geoestadística. Es difícil dar una definición formal de textura, aunque intuitivamente aceptamos que este descriptor de la imagen proporciona medidas de propiedades tales como suavizado, tosquedad y regularidad de la misma. Por tanto, vamos a considerar la textura como una medida de la tasa de variación espacial de los niveles digitales o de cualquier otro parámetro que sea función de éstos, como es el caso del NDVI.

En el procesamiento de imágenes hay una gran diversidad de métodos de análisis textural, entre los cuales destacamos los de base estadística que corresponden a un grupo amplio en el cual se

enmarca esta metodología. Estos métodos suelen operar en una vecindad local mediante ventanas móviles que se desplazan por la imagen píxel a píxel, asignando el valor de la función calculada al píxel central; por ejemplo, parámetros estadísticos locales (varianza), entropía, medidas sobre la matriz de co-ocurrencias, y más recientemente el uso de parámetros geoestadísticos obtenidos a partir de la función variograma (Carr, 1996; Lark, 1996; Miranda *et al.*, 1998; Chica-Olmo y Abarca, 2000; Chica-Olmo y Ruiz-Castellano, 2003). También cabe señalar la propuesta de métodos que utilizan la información textural para el análisis de cambios como el propuesto por Daryaei (2003), basado en redes neuronales y wavelet, o el método aquí presentado, con base geoestadística.

En este trabajo se aporta una contribución original de los métodos geoestadísticos al estudio de imágenes de satélite, concerniente a la utilización de la función variograma pseudo-cruzado para la creación de imágenes de co-textura y su interpretación en el contexto de la detección de cambios de imágenes Landsat TM.

IMÁGENES Y PRETRATAMIENTO

Para este estudio se han utilizado dos imágenes Landsat TM adquiridas el 14-8-1985 y el 26-8-1995, respectivamente, de las que se ha extraído una subescena correspondiente a la zona noroeste de la ciudad de Granada, representada en la Figura 1. Esta región queda enmarcada dentro de las siguientes coordenadas UTM: 433183-4116784 (límite suroccidental) y 444880-4127822 (límite nororiental).

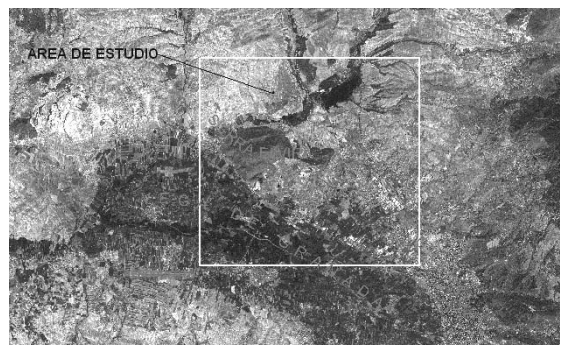


Figura 1. Localización del área del estudio.

Aunque para el estudio podría haberse utilizado cualquier pareja de bandas espectrales pertenecientes, respectivamente, a una u otra imagen, se ha optado por utilizar los índices de vegetación (NDVI) correspondientes a cada año de estudio. El criterio viene dado por la capacidad de discriminación que el rojo-visible y el infrarrojo cercano tienen tanto para la vegetación como para las zonas urbanas (Seto *et al.*, 2002). No obstante, podrían contemplarse otras posibilidades como son las transformadas ACP o Tasseled Cap (verdor) o, cualquier otra información extraída a partir de los valores radiométricos.

Por otra parte, se ha realizado una corrección geométrica de las imágenes mediante el sistema de puntos de control y de una función de transformación polinomial ($K=1$), para trabajar con imágenes georeferenciadas (UTM). La primera imagen se ha corregido respecto a la ortoimagen 1:10.000 de la Junta de Andalucía y la segunda imagen se ha corregido con respecto a la primera. En ambos casos, la transformación ha sido satisfactoria, obteniéndose errores residuales, medidos como la raíz del error cuadrático medio (o *RMS error* en inglés) de la distancia entre la posición real de la coordenada en la ortoimagen y la posición transformada en la imagen TM, inferiores a la mitad del tamaño del píxel (30 m). La corrección geométrica de las imágenes tiene especial importancia, ya que un desfase espacial entre las imágenes provocaría la aparición de cambios espurios que no corresponderían con la realidad.

En cuanto a la corrección radiométrica, se realizó una transformación de número digital a radiancia utilizando los coeficientes de transformación del sensor Thematic Mapper correspondientes a las fechas de las dos imágenes utilizadas. Se realizó posteriormente una corrección atmosférica de las imágenes para transformar los valores de radiancia a reflectividad. Para ello se utilizó el método de corrección atmosférica relativa propuesto por Caselles y López-García (1989), sencillo de aplicar y útil en el caso de estudios multitemporales. Por otra parte, la utilización de un cociente de bandas espectrales, como es el caso, ayuda también a corregir la distorsión provocada por las condiciones atmosféricas o del relieve. No obstante, el procedimiento podría ser aplicado igualmente a valores de reflectividad.

METODOLOGÍA

La obtención de descriptores texturales geoestadísticos de imágenes de satélite se fundamenta en el uso de diferentes modelos de funciones variograma

(Chica-Olmo y Abarca, 2000). A diferencia de un operador de textura local de varianza, los operadores geoestadísticos de textura, locales o globales, introducen un aspecto de especial interés referente a la correlación, o si se quiere, variabilidad espacial de los datos radiométricos. Es decir, introducen el concepto de regionalización de los valores digitales en la vecindad de trabajo, lo que implica una disposición no aleatoria de los mismos en la imagen, que caracteriza a las distintas cubiertas temáticas.

En nuestra aproximación geoestadística el número digital radiométrico observado en un píxel x de una imagen, $ND(x)$, es considerado como una variable regionalizada, caracterizada por una componente de variación aleatoria y otra estructurada. Ambos aspectos son estudiados conjuntamente a partir de la función variograma, dada por la expresión clásica de Matheron (1971):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \{ ND(x+h) - ND(x) \}^2 \quad (1)$$

Donde $\gamma(h)$ representa la mitad de la esperanza de los incrementos cuadráticos de las parejas de NDs distantes el vector h .

La utilización de esta función en la creación de imágenes texturales está muy aceptada, ya que es considerada como una potente herramienta para el análisis de la autocorrelación espacial de los valores digitales. Sin embargo, para su aplicación a la detección de cambios debe introducirse el concepto de correogionalización, por medio de un modelo que describa la variabilidad espacial conjunta de las dos imágenes comparadas. La función más apropiada para este propósito es el variograma pseudo-cruzado $\gamma_{j,k}(h)$, que representa la varianza de las diferencias cruzadas entre dos informaciones espectrales (nd_j y nd_k) para un vector de distancia h , cuyo estimador es (Chica-Olmo y Abarca, 2000):

$$\gamma_{j,k}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} \{ nd_j(x_i) - nd_k(x_i+h) \}^2 \quad (2)$$

donde $n(h)$ es el número de parejas de valores digitales pertenecientes a la imágenes j y k , respectivamente, y distantes el vector h (definido por su módulo y ángulo). Esta función es esencial para describir un modelo geoestadístico de correogionalización de un conjunto de imágenes (Chica-Olmo y Abarca, 1998); es decir, un modelo de variabilidad espacial conjunta entre las imágenes j y k . En este

caso, servirá como herramienta para obtener una imagen en la que se aprecien los cambios espaciales entre las imágenes estudiadas j y k . Así, como ejemplo, en la Figura 2 se muestra el modelo de correogionalización para NDVI-85 y NDVI-95, en la que se aprecia un aumento paulatino de la co-variabilidad conforme aumenta el paso de distancia h , con un efecto de deriva para distancias grandes, que parece alcanzar un valor de meseta alrededor de los 10 Km.

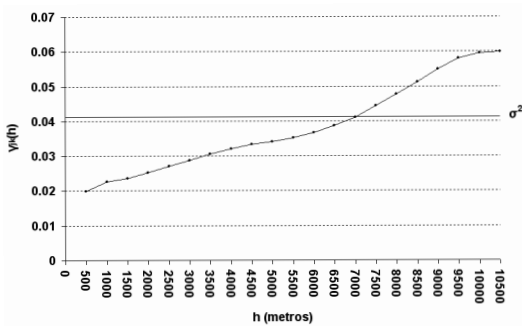


Figura 2. Variograma pseudo-cruzado NDVI-85 / NDVI-95 ($h=500$ m.).

Con esta aproximación es simple obtener una imagen de cambio textural aplicando un kernel o ventana móvil para calcular la función variograma pseudo-cruzado a partir de los valores del NDVI de ambas fechas, asignando el valor de cambio al píxel central del kernel. Esta operación es repetida desplazando la vecindad, píxel a píxel, por ambas imágenes hasta obtener la imagen final de co-textura. El proceso general de aplicación de la ecuación (2) se ilustra en la Figura 3.

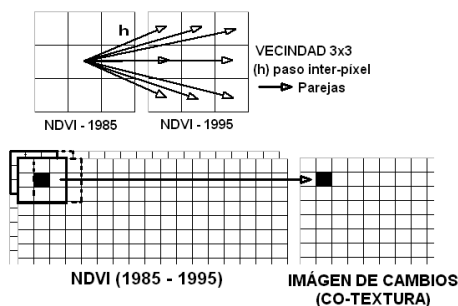


Figura 3. Descripción del algoritmo de cálculo de la imagen de co-textura para una vecindad 3x3.

RESULTADOS

En el ejemplo presentado se ha constatado que los resultados obtenidos muestran ciertas diferencias en función del tamaño de la ventana u orden del kernel (robustez estadística) y, también, del paso de la función variograma (h). Un estudio previo con diferentes valores para estos parámetros es aconsejable, a efectos de caracterizar e interpretar correctamente las variaciones de las distintas cubiertas temáticas. Así, para valores de paso h pequeños (corta distancia) se caracterizan mejor los cambios texturales en cubiertas heterogéneas, mientras que para pasos mayores el mismo efecto se produce para cubiertas más homogéneas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que un paso h demasiado alto puede provocar la comparación entre cubiertas distintas, reflejando un cambio que en realidad es ficticio.

En la Figura 4 podemos observar, grosso modo, lo anteriormente comentado; se han comparado las imágenes de co-textura obtenidas a partir de vecindades de tamaño 3x3 y 9x9. La imagen de cambios de vecindad 3x3 alcanza valores más altos que la de 9x9 ya que es más sensible a las zonas donde existe una gran variabilidad. También, se observa en ambos casos una variabilidad casi nula en zonas de suelos en cultivo de secano, zonas urbanas consolidadas, y cubiertas de vegetación densa (en especial las choperas). Sin embargo, con un realce lineal de los valores de co-textura obtenidos, se aprecian mejor los cambios producidos en la zona de Sierra Elvira con vecindad 9x9, interpretados como el aumento de la plantación de olivo y coníferas a expensas del matorral en las zonas más alomadas con menor pendiente. Por otra parte, es destacable que la mayor intensidad en el cambio corresponde esencialmente a las zonas en regadío, debido a una serie de factores como son los tipos de cultivo, estado fenológico, nivel de humedad y, por supuesto, la aparición de los espacios rururbanos, que producen un paisaje característico fácilmente apreciable por su aspecto textural. Sin embargo, el mapa de co-textura con vecindad 9x9 muestra una mayor superficie de cambio que el obtenido con vecindad 3x3 debido a que a mayor tamaño de kernel es posible detectar los cambios producidos entre zonas más alejadas, no detectables con un kernel 3x3.

Finalmente, en la Figura 5 se ha representado el histograma acumulado de la intensidad de cambio en función de la vecindad. Se constata que la vecindad 9x9 muestra mejor los cambios de intensidad

bajos ya que el crecimiento de la curva es menos acentuado que en el caso de la vecindad 3x3. Por el contrario, parece que la vecindad 3x3 muestra mejor los cambios de mayor intensidad.

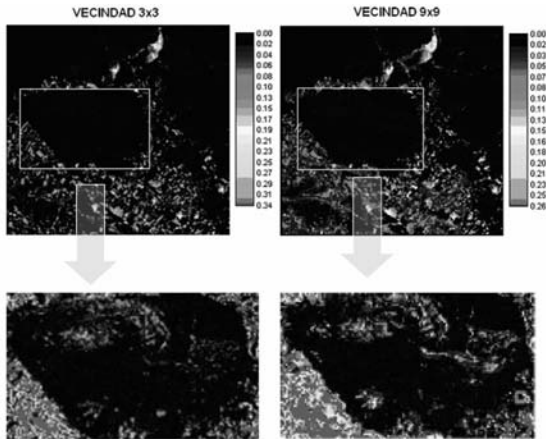


Figura 4. Comparación de los mapas de co-textura para vecindad de 3x3 y 9x9.

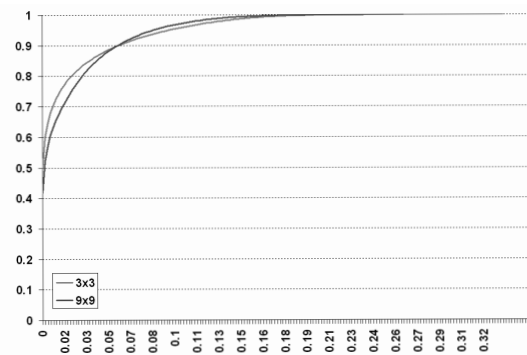
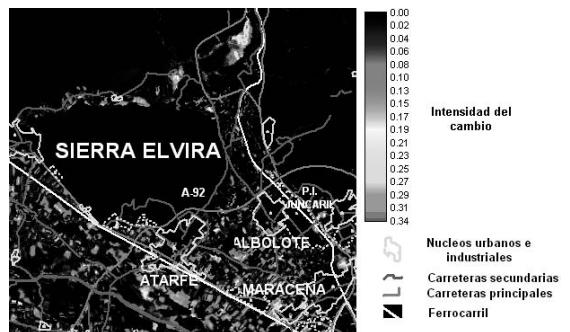


Figura 5. Histogramas acumulados de la intensidad de cambio para vecindad de 3x3 y 9x9.

CONCLUSIONES

La utilización de las herramientas geoestadísticas en el análisis de imágenes de satélite tiene un espectro muy variado de aplicaciones. En este caso, los resultados obtenidos han puesto de manifiesto el interés de utilizar la función variograma

pseudo-cruzado, para caracterizar las diferencias texturales entre dos imágenes y su aplicación en la detección de cambios. La imagen de co-textura elaborada puede servir de ayuda para una interpretación más correcta de los cambios en las cubiertas temáticas. Como ejemplo, se ha representado en la Figura 6 el mapa final de cambios obtenidos para el área de estudio, en el que se aprecia de forma clara que los cambios se han producido esencialmente en las zonas de cultivo en regadío. Este efecto es más notorio en la zona comprendida entre la autovía A-92 y los núcleos de población de Atarfe, Albolote, Maracea y el P.I. Junca-ril. Esta área es hoy claramente una zona rururbana, surgida de la presión que, sobre el suelo rural, ejercen los usos urbanos que entran en un claro conflicto con los usos agrícolas, creándose espacios poco articulados pertenecientes al denominado paisaje rururbano.



*Figura 6. Mapa final de cambios para vecindad 3x3.

Por último, constatamos la importancia que tiene una correcta selección del tamaño de la vecindad y del paso del variograma, en función del tipo de análisis que se pretenda realizar. También, sería interesante profundizar en otras aplicaciones abarcando otras áreas geográficas con características temáticas diferentes a la estudiada, así como incluir otras funciones que, desde la perspectiva geoestadística presentada, estamos seguros pueden facilitar el análisis de cambios en teledetección.

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el contexto del proyecto de investigación BTE2002-00152 financiado por el MEC y con la ayuda facilitada por la Junta de Andalucía al grupo de investigación RNM122.

BIBLIOGRAFÍA

- CASELLES, V. y LÓPEZ-GARCÍA, M. J. 1989. An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies. *International Journal of Remote Sensing*. 10(6): 1127-1134.
- CHICA-OLMO, M. y ABARCA, F. 1998. Radiometric Coregionalization of Landsat TM and SPOT HRV Images. *International Journal of Remote Sensing*. 19(5): 997-1005.
- CHICA-OLMO, M. y ABARCA, F. 2000. Computing Geostatistical Image Texture for Remotely Sensed Data Classification. *Computers & Geosciences*. 26: 373-383.
- CHICA-OLMO, M. y RUIZ-CASTELLANO, J. P. 2003. Análisis Geoestadístico de las Áreas de Entrenamiento en la Clasificación Digital de Imágenes de Satélite. Teledetección y Desarrollo Regional. X Congreso Nacional de Teledetección, Cáceres pp. 301-304.
- CARR, J. R. 1996. Spectral and Textural Classification of Single and Multiple Band Digital Images. *Computers & Geosciences*. 22: 849-865.
- CHUVIECO, E. 1998. El Factor Temporal en la Teledetección: Evolución Fenomenológica y Análisis de Cambios. *Revista de Teledetección*. 10: 39-48.
- DARYAEI, J. 2003. Digital Change Detection Using Multi-scale Wavelet Transformation & Neural Network. (Inédito). MSc. in Geoinformatics, International Institute for Aerospace survey and Earth Sciences (ITC), Enschede (Holanda). http://www.itc.nl/library/Papers_2003/msc/gfm/daryaie.pdf
- LARK, R.M. 1996. Geostatistical Description of Texture of an Aerial Photograph for Discriminating Classes of Land Cover. *International Journal of Remote Sensing*. 17: 2115-2133.
- MARTÍN-VIVALDI, M.E. y JIMÉNEZ, Y. 1995. Transformaciones del Paisaje en el Área de Influencia de la Capital Granadina: la Vega de Granada. *Cuadernos Geográficos*, 22-23: 175-193.
- MAS, J.F. 1999. Monitoring Land-Cover Changes: a Comparison of Change Detection Techniques. *International Journal of Remote Sensing*. 20(1): 139-152.
- MATHERON, G. 1971. The Theory of Regionalized Variables and its Applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Ecole des Mines de Paris, Fascicule 5, Fontainebleau 211 pp.
- MENOR, J. 2000. *La Vega de Granada, Transformaciones Agrarias Recientes en un Espacio Periurbano*. Universidad de Granada I.D.R. Monográfica Tierras del Sur, Granada. 504 pp.
- MIRANDA, F. P., FONSECA, L. E. N. y CARR, J. R. 1998. Semivariogram Textural Classification of JERS-1 (Fuyo-1) SAR Data Obtained Over a Flooded Area of the Amazon Rainforest. *International Journal of Remote Sensing*. 19: 549-556.
- SETO, K.C., WOODCOCK, C. E., SONG, C., HUANG, X., LU, J., y KAUFMANN, R. K. 2002. Monitoring Land-Use Change in the Pearl River Delta Using Landsat TM. *International Journal of Remote Sensing*. 23: 1985-2004.
- SINGH, A. 1989. Digital Change Detection Techniques Using Remotely-Sensed Data. *International Journal of Remote Sensing*. 10: 989-1003.