

## **ANALISIS GEOESTADISTICO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE DATOS MULTIESPECTRALES TM Y SPOT**

M. Chica-Olmo y F. Abarca Hernández

*G.I. "Geoestadística, Teledetección y GIS". Departamento de Geodinámica  
Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. Av. Fuentenuueva S/N. 18071 GRANADA  
Tfno/Fax: (958) 243363. Email: grsg@carpanta.ugr.es.*

**RESUMEN.**- En Teledetección espacial la función variograma de la variable regionalizada número digital (ND), permite cuantificar la dependencia espacial entre píxeles. Esta característica de continuidad, o si quiere, variabilidad espacial de la imagen es una variable importante en Teledetección. En este trabajo se presentan brevemente los resultados obtenidos en un estudio geoestadístico de análisis de la función variograma en imágenes LANDSAT TM y SPOT PAN. El método se ha desarrollado y aplicado en un área de interés geomínero con el objetivo de caracterizar el diferente grado de variabilidad radiométrica asociada a distintos tipos de alteraciones hidrotermales de rocas volcánicas.

**ABSTRACT.**- In Remote Sensing the variogram function of the digital number regionalized variable (ND), allows us to quantify the spacial correlation among pixels. This characteristic of continuity, or if you like, spacial variability of the image is an important variable in Remote Sensing. In this paper we give the results obtained in a geostatistic analysis of the variogram function in LANDSAT TM and SPOT PAN images. The method has been developed and applied in an area of geomining interest with the objective of characterizing the different grades of radiometric variability associated to different types of hydrothermal alterations of volcanic rocks.

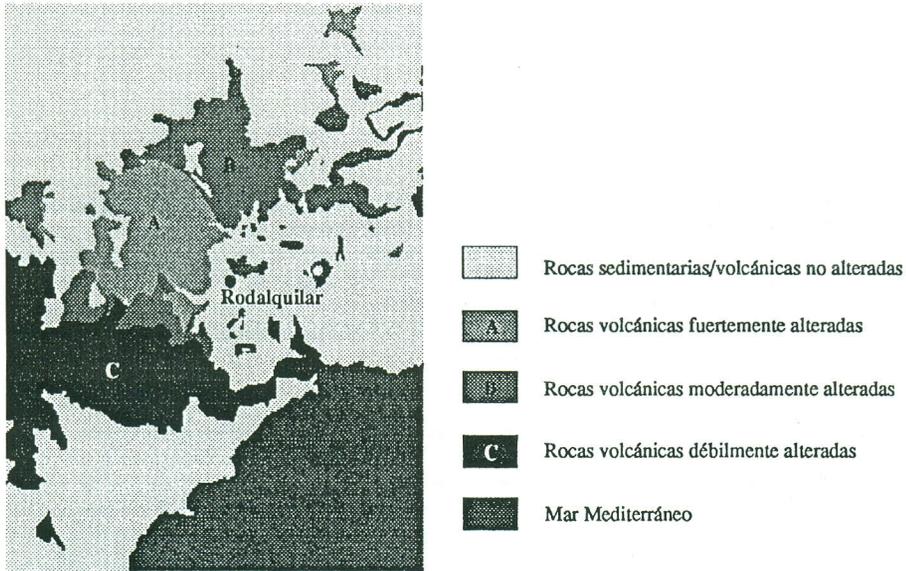
### **1.- INTRODUCCION**

Desde el punto de vista geoestadístico el valor digital (ND) de una imagen de satélite puede ser considerado como una variable regionalizada (Chica-Olmo, 1991). Sus características son, por un lado, un aspecto aleatorio de la información numérica y, por otro lado, la existencia de una estructura de correlación o de variabilidad espacial, llamada variograma. Diversos autores han señalado el interés de la utilización de esta función geoestadística en el campo de la Teledetección espacial (Caselles, 1987; Woodcock 1988; Atkinson, 1985).

En este trabajo se muestran resumidamente los resultados obtenidos en un estudio de análisis de la variabilidad espacial de imágenes LANDSAT TM y SPOT pancromática a través de la función variograma. El área de estudio se ubica en la región de Cabo de Gata, próxima a las explotaciones mineras de Rodalquilar. Para el mismo se ha dispuesto de dos subescenas LANDSAT y SPOT que cubren el área. Esta región ha sido sometida a una explotación intensa durante un largo periodo de tiempo, estando los principales yacimiento ligados a zonas donde afloran las rocas volcánicas con alteraciones de carácter hidrotermal.

La zona de estudio viene definida por las siguientes coordenadas UTM: (581660, 4083701) y (58870, 4073741), correspondientes al punto superior izquierdo e inferior derecho respectivamente. Las imágenes cubren un área de 72 Km<sup>2</sup>, con un tamaño en píxeles de 721 x 996 para la SPOT y 241 x 332 para la imagen LANDSAT.

La geología del área la definen rocas volcánicas y sedimentarias de edad neógena, si se exceptúan los recubrimientos cuaternarios. Las rocas volcánicas son de carácter calcoalcalino, variando entre andesitas y riolitas, (Arribas et al, 1989). Una gran parte de las rocas volcánicas del área están afectadas por fenómenos de alteración hidrotermal más o menos intensos. Para esta aplicación nos hemos centrado en las rocas volcánicas alteradas, las cuales se han agrupado en tres grupos atendiendo al grado de alteración: bajo, medio y alto. Se puede ver la distribución de las clases en la Figura 1.



**Figura 1.-** Distribución de las rocas volcánicas alteradas clasificadas en tres grupos atendiendo al grado de alteración.

## 2.- OBJETIVOS

El objetivo básico de este trabajo es el análisis de la variabilidad espacial de datos digitales de imágenes TM y SPOT en un área de interés geológico-minero. Este análisis se ha enfocado para obtener información complementaria de tipo textural para la caracterización litológica. Para abordar este análisis se ha calculado la función geoestadística variograma en áreas con características texturales, a priori, diferentes, correspondientes a materiales volcánicos con diferentes grados de alteración. Por tanto, cabe suponer que este atributo esté ligado al aspecto textural, además de considerarlo de interés en el marco de nuestras investigaciones.

El estudio de la variabilidad espacial de las clases, por separado y conjuntamente, se ha llevado a cabo a partir del cálculo e interpretación de los variogramas. Se pretende con ello aportar una metodología de interés que abunda en un aspecto poco explorado como es el análisis textural.

## 3.- METODOLOGIA

### 3.1.- Aspectos generales

El número digital de una imagen es considerado como una variable regionalizada (VR) en el sentido geostatístico; es decir, se interpreta como una función  $ND(x)$  que da el valor ND en un punto  $x$  (píxel) de la imagen definido, ya sea por el sistema clásico de fila y columna, o bien, por sus coordenadas geográficas.

Podemos entonces considerar una imagen como una realización de una Función Aleatoria (FA), con una distribución espacial caracterizada por dos aspectos; por un lado, el carácter aleatorio, y por otro, el estructural, que es el que pone de manifiesto el grado de continuidad o variabilidad de la variable regionalizada, por medio del variograma.

Una característica de interés relacionada con la variabilidad o continuidad espacial es la anisotropía; se trata de un comportamiento diferencial de la función de variabilidad dependiente de la dirección.

Como primer paso en el estudio de la variabilidad espacial de la variable ND para la banda  $i$  se ha estimado la función variograma de acuerdo a la Ecuación 1. Esta función representa la mitad de los incrementos cuadráticos medios de los números digitales.

$$\gamma_i(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (nd_i(x) - nd_i(x+h))^2 \quad (1)$$

donde  $n(h)$  es el número de parejas,  $x$  y  $x+h$  son las coordenadas de la pareja de píxeles distantes  $h$ .

Puesto que es frecuente en Teledetección disponer de imágenes multiespectrales, por ejemplo imágenes LANDSAT, se ha calculado también el variograma cruzado entre parejas de bandas  $i, j$  de acuerdo a la Ecuación 2. Esta función es útil para analizar la variabilidad espacial conjunta entre bandas.

$$\gamma_{ij}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (nd_i(x) - nd_j(x+h))^2 \quad (2)$$

La estimación de esta función, tanto directa como cruzada, se ha realizado según las direcciones principales, N-S, E-W, NW-SE, NE-SW y medio, con el fin poder estudiar la posible anisotropía espacial de los ND.

A fin de posibilitar la comparación de los variogramas entre diferentes clases de alteración, entre bandas y entre sensores, se ha definido el variograma relativo. Este se obtiene al normalizar el variograma experimental por la varianza de los datos.

### 3.2.- Procedimiento de cálculo

Los ND se disponen según una malla de tamaño regular, 30x30m ó 10x10m según sensor. Este hecho permite simplificar el algoritmo de cálculo del variograma, permitiendo la supresión de tolerancias, tanto espaciales como angulares, y diseñado un algoritmo para las direcciones principales: N-S, E-W, NE-SW y NW-SE. De esta forma se ha conseguido optimizar el tiempo de cálculo y, al usar memoria dinámica, capaz de operar con imágenes de gran tamaño.

El algoritmo que se ha desarrollado para la estimación de la función variograma ha sido programado en lenguaje C, Listado 1, y usado bajo DOS, Linux y Solaris.

/\* cálculo de la función variograma en la dirección N-S \*/  
/\* vr puntero a donde está ubicada la imagen de col x lin píxeles\*/

```

/* pas es el valor de paso de cálculo de variograma */
/* kmax controla la distancia máxima de cálculo */
/* salida: nc numero de parejas, d distancia, g valor variograma */

int vario_n_s (vr.pas,kmax,nc,g,d,col,lin)
char unsigned *vr;
int pas,kmax,*nc;
float *g,*d;
int long col,lin; /*número de líneas y columnas de la imagen vr*/
{
    int pc,i,A,B,C;
    float vrr;

    pc=i=0;
    for A=pas;A <= kmax*pas;A += pas) {
        for (B=0;B < col;B++) {
            pc=B;
            for (C=0;C < lin-A;C++) {
                nc[i]++;
                vrr=vr[pc]-vr[pc+col*A];
                d[i] += A;
                g[i] += 0.5*vrr*vrr;
            }
            pc += col;
        }
        i++;
    }
    for (i=0;i < kmax;i++) {
        d[i]=d[i]/ (1 > nc[i] ? 1:nc[i]);
        g[i]=g[i]/ (1 > nc[i] ? 1:nc[i]);
    }
}

```

**Listado 1.** Algoritmo de estimación de la función variograma para la dirección N-S.

Después del cálculo, se han interpretado los variogramas obtenidos de acuerdo a los conocimientos geológicos del área estudiada. Finalmente, el análisis variográfico termina con el ajuste de los variogramas experimentales a modelos teóricos (Journel, 1992). McBratney y Webster (1986) proporcionan una lista de los modelos más comúnmente usados. Los modelos utilizados están definidos por dos parámetros, la meseta y el alcance. Además, el modelo puede presentar una discontinuidad en el origen llamada efecto de pepita ( $C_0$ ), debida a fluctuaciones aleatorias del ND entre píxeles.

En la fase de ajuste hay que tener en cuenta la anisotropía que pueda presentar la variable ND; así, un modelo debe ajustarse a todas las direcciones estimadas. Para lograr un buen ajuste es necesario disponer de herramientas que proporcionen utilidades para este fin. Para el ajuste variográfico se ha diseñado y desarrollado un programa que permite, de un modo interactivo, el ajuste semiautomático que simplifica notablemente esta tarea.

#### 4.- RESULTADOS

De acuerdo a lo expuesto en apartados anteriores, la información de partida han sido dos imágenes, TM y SPOT PAN, sobre las que se han diseñado tres máscaras correspondientes a las respectivas clases de alteración hidrotermal, Figura 1.

Los resultados obtenidos en este estudio están basados en la interpretación de los variogramas representados en la Figuras 2, apoyados numéricamente por la Tabla I, en la que se da la relación de modelos teóricos ajustados a los variogramas experimentales.

Se exponen seguidamente algunos de los resultados más interesantes. En la Figura 2 se han trazado los variogramas que se han interpretado, siendo éstos una síntesis de los que se han calculado. Reseñar la importancia que reviste el variograma relativo,  $\gamma/\sigma^2$ , para poder

comparar variogramas de distintas bandas o imágenes. Los modelos se han ajustado en términos igualmente relativos, esto quiere decir que las mesetas de los modelos representan porcentajes de varianza.

En primer lugar se han calculado los variogramas relativos correspondientes a las seis bandas del TM de la imagen global (se ha excluido TM6), Figura 2a; como se puede observar, la variabilidad de todas las bandas es similar, esto puede ser explicado por el hecho de que la variabilidad viene determinada por la forma y tamaño de los objetos que componen la imagen, como los objetos presentes en la imagen son los mismos en todas las bandas, cabe pensar que la variabilidad no dependa de la banda elegida. Este hecho se pone igualmente de manifiesto mediante el cálculo del variograma cruzado entre bandas, Ecuación 2, y comparación con el variograma directo, ambos son muy parecidos, y en ocasiones casi coincidentes.

De acuerdo a la Figura 2a, el comportamiento de la variabilidad viene definido por dos estructuras, una de corto alcance (10 píxeles) y otra de largo alcance (70 píxeles), ambas con una meseta similar; o sea, que cada estructura representa en torno al 50% en términos de varianza. Los valores de alcances determinan la distancia para la cual se pierde la correlación entre datos, quiere esto decir que datos distantes 2.5 Km presentan correlación espacial, si bien esta distancia depende de la forma y tamaño de los objetos que definen la imagen, y va a ser lo que nos permita diferenciar aspectos texturales en las clases de alteración.

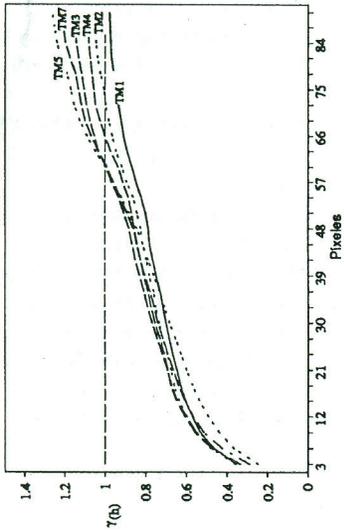
Dada la similitud entre la variabilidad espacial de las bandas del TM se ha seleccionado una banda para el análisis variográfico y evitar redundancias en los cálculos. Para este estudio se ha seleccionado la banda TM7, pero los resultados no variarían si se tomara otra.

En la Figura 2b se han trazado los variogramas de la banda TM7 correspondientes a dos direcciones ortogonales (N-S y E-W), los cuales ponen de manifiesto la presencia de un comportamiento diferencial dependiente de la dirección, llamado anisotropía, y expresado en la Tabla I como cociente del alcance en la dirección N-S y E-W. Este factor determina la dirección de mayor o menor continuidad espacial de la radiometría de los objetos de la imagen. Si es mayor de 1, habrá más continuidad en la dirección N-S y E-W si es menor.

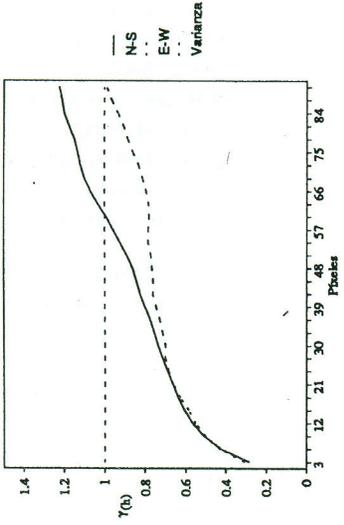
Para los casos en los que el factor esté próximo a 1, no habrá dirección preferente, por lo que los objetos tendrán un comportamiento isótropo. Se observa en la Figura 2b que la estructura de corto alcance no presenta anisotropía y sí en cambio la segunda. Esto es posible debido a que los objetos de corto y largo alcance son distintos.

El análisis variográfico se ha realizado igualmente en las tres máscaras, tanto en LANDSAT como SPOT, obteniendo los resultados que se representan en las Figuras 2c y 2d respectivamente, y cuyos modelos teóricos se listan en la Tabla I.

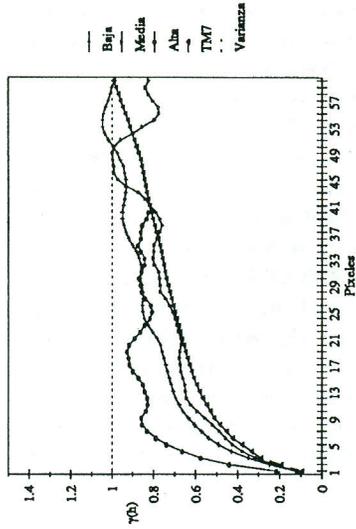
Todos los modelos se han ajustado como suma de dos modelos esféricos, uno de corto alcance que está en torno a 10 píxeles y otro de largo alcance que llega a 70 píxeles. En las máscaras LANDSAT la clase que presenta un menor correlación espacial en la estructura de corto alcance es la de alta alteración, por el contrario, la mayor continuidad espacial se da en la clases de alteración media, correspondiendo la clase baja alteración a un término intermedio. En cuanto a la anisotropía, es similar en todas las clases, con valores bajos, siendo la dirección N-S la más continua. En la estructura de largo alcance se observa un comportamiento similar en los alcances, aunque si son significativos los valores de anisotropía, llegando a 2 en la clases baja alteración.



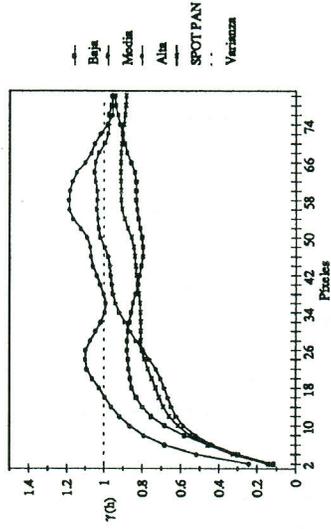
a) Variogramas relativos LANDSAT (N-S)



b) Variogramas TM7 (N-S y E-W)



c) Variogramas relativos TM7 global y clases



d) Variogramas relativos SPOT PAN y clases

Figura 2.- Variogramas calculados e interpretados en el estudio de variabilidad espacial de imágenes LANDSAT y SPOT

<u>LANDSAT</u>	<u>Co</u>	<u>Modelo</u>	<u>Alcance(a)</u>	<u>Meseta(c)</u>	$A_{N-S}/A_{E-W}$
Global	15.0	Esférico	11.0	70.0	1.1
		Esférico	84.0	103.0	0.9
Baja	6.2	Esférico	8.0	42.0	1.2
		Esférico	53.0	47.0	2.0
Media	13.0	Esférico	12.0	58.3	1.2
		Esférico	78.0	74.0	1.7
Alta	0.0	Esférico	4.2	50.5	1.2
		Esférico	13.0	71.0	1.0
<u>SPOT</u>	<u>Co</u>	<u>Modelo</u>	<u>Alcance(a)</u>	<u>Meseta(c)</u>	$A_{N-S}/A_{E-W}$
Global	0.0	Esférico	12.7	130.0	0.55
		Esférico	71.5	100.0	0.3
Baja	0.0	Esférico	17.0	90.7	0.6
		Esférico	81.5	26.0	0.0
Media	0.0	Esférico	11.0	118.0	0.6
		Esférico	59.5	143.0	0.4
Alta	0.0	Esférico	9.0	162.3	0.55
		Esférico	20.0	120.0	0.45

Tabla I.- Modelos teóricos ajustados de las imágenes LANDSAT(L) y SPOT(S)

En las imágenes SPOT la clase con menor correlación espacial es igualmente la de alta alteración, en cambio la más continua es la clase baja alteración. La anisotropía es muy fuerte en las dos estructuras, siendo la dirección de mayor continuidad la E-W.

Se concluye que existen diferencias importantes en la variabilidad espacial entre las clases de diferente alteración, siendo por tanto susceptibles de ser utilizadas para la caracterización textural y estructural. También son importantes las diferencias entre las imágenes LANDSAT y SPOT, esto se debe a que los objetos discriminados por el análisis variográfico son distintos para cada sensor como en principio cabría esperar.

## 5.- CONCLUSIONES

En este trabajo se aporta la metodología necesaria para abordar un análisis variográfico de imágenes de satélite con el fin de obtener información de carácter textural, dando las directrices a seguir para integrar esta información en el campo de la Teledetección.

La metodología está basada en el cálculo del variograma experimental, interpretación y su ajuste a un modelo teórico. El análisis variográfico de detalle que se ha llevado a cabo ha revelado importantes aspectos de la variabilidad espacial de las imágenes de satélite SPOT y LANDSAT. Los aspectos más relevantes de este análisis han sido, la casi coincidencia de la variabilidad en las distintas bandas del sensor TM, y asimismo, la coincidencia con la imagen SPOT, y por otro lado, la importancia de la existencia de anisotropía espacial de los valores digitales.

## 6.- AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo ha sido posible gracias al Proyecto de I+D "DARSTIMEX" del Programa BRITE/EURAM de la CE y a la financiación recibida por la DGICYT correspondiente al proyecto PB92-0925-CO2-02.

## 7.- BIBLIOGRAFIA

- Atkinson, Peter M., Harrison, Andrew R. 1995. *An improved method of estimating measurement error in remotely sensed*. Sensors and Environmental applications of Remote Sensing. Pp 399-406. Askne (ed.)
- Arribas, A.Jr., Rytuba, JJ, Rye, R.O., Cunningham, C.G., Podwysocki, M.H., Kelly, W.C., Arribas, A., McKee, E.H. and Smith, J.G. (1989) *Preliminary study of the ore deposits and hydrothermal alteration in the Rodalquilar caldera complex, southeastern Spain*. U.S. Geol. Survey Open-File Report 89-327, 39 p.
- Caselles, V.(1987). *La utilidad del semivariograma en estudio de teledetección*. En 2ª Reunión Nacional de Grupos de Trabajo en Teledetección. Valencia. pp 121-129.
- Chica-Olmo, M., Vives, E. y Abarca, F. (1991). *Métodos geoestadísticos aplicados al análisis de variables espaciales en Teledetección*. IV Reunión Científica asociación Española de Teledetección.
- Chica-Olmo, M., Abarca, F. y Pardo, E. (1993). *Simulación de imágenes de satélite*. V Reunión Científica asociación Española de Teledetección.
- Journel, André G. And Deutsch, Clayton V. (1992). *GSLIB. Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press. 340 p.
- McBratney, A.B., and Webster, R., 1986, Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*,37,617-639.
- Woodcock, Curtis E.(1988). *The use of variograms in Remote Sensing: II. Real Digital Images*. Remote Sensing of Environment.