

## Análisis geoestadístico de los canales submarinos en el talud superior del Golfo de Cádiz (SO de la Península Ibérica)

*Geostatistical analysis of the submarine channels in the upper slope of the Gulf of Cadiz (SW Iberian Peninsula)*

L.M. Fernández-Salas (1), N. Sánchez-Rubio (2), J.T. Vázquez (3), V. Díaz del Río (3), N. López-González (3), R. Sánchez-Leal (1), G. Bruque (4), F.J. López-Rodríguez (3), D. Palomino (3) & M.C. Fernández-Puga (2)

- (1) Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Cádiz. Muelle Pesquero S/N, 11006 Cádiz. E-mail: luismi.fernandez@cd.ieo.es
- (2) Dpto. Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz. Avda República Saharaui S/N, 11510, Puerto Real, Cádiz.
- (3) Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Málaga, C/Puerto Pesquero S/N, 29640 Fuengirola.
- (4) Instituto Español de Oceanografía, Sede Central. C/Corazón de María, 8, 28002 Madrid.

**Abstract:** Five different groups of gullies have been distinguished along the northeastern slope of the Gulf of Cádiz using geostatistical analysis. A Grouping Analyst has been carried out to six morphological variables of the gullies: area, straight line length, width/depth ratio, width, depth and stream order. The spatial distribution of the identified five groups and their mean characteristics have allowed us to propose an evolutionary model for the two zones of the upper continental slope. This model is related to the local physiography, the sediment supply, the tectonic control and the oceanographic regime.

**Key words:** gullies, geostatistical analyst, upper continental slope, Gulf of Cadiz.

### 1. INTRODUCCIÓN

Entender los procesos que operan en los márgenes continentales es esencial para interpretar los procesos de erosión del fondo marino, con el desarrollo de canales y cañones, la dinámica sedimentaria del talud continental y la evolución del margen continental (Gales *et al.*, 2013a). Los canales submarinos son tipos morfológicos erosivos comunes en los taludes de los márgenes continentales y sirven de conductos para la transferencia de sedimentos desde la plataforma hacia la cuenca. Durante la última década, son muchos los trabajos centrados en el estudio de las características morfológicas y morfométricas de dichas formas en taludes continentales de diferentes latitudes (Gales *et al.*, 2013a, 2013b; García *et al.*, 2006, Micallef & Mountjoy, 2011; Vachtman *et al.*, 2012) con el objetivo de establecer diferencias en el tipo de sustrato, en las características espaciales y en los procesos sedimentarios del talud continental. Pero existen pocos trabajos que hayan realizado análisis estadísticos de las variables medidas sobre estos canales.

El análisis geoestadístico permite encontrar las variables morfométricas más importantes para la

diferenciación de grupos de canales y realizar un procedimiento de clasificación que intenta conocer clústeres naturales en el conjunto de datos analizados. Así, a través de esta herramienta se pueden realizar estudios que permiten discernir los procesos que afectan a la forma de los canales en cada uno de los grupos diferenciados, de forma que se puedan detectar particularidades espaciales entre zonas contiguas de un mismo campo de canales.

Teniendo en cuenta que la zona estudiada en el talud superior del Golfo de Cádiz (GdC) es relativamente pequeña y con unas características más o menos homogéneas en cuanto al tipo de sustrato, es de esperar que éste no tenga una influencia significativa en la morfología de los canales. Por tanto, como objetivo principal de este trabajo planteamos un análisis cuantitativo geoestadístico de las variables morfológicas medidas sobre los canales, de forma que permita reducir la incertidumbre interpretativa del agrupamiento de dichos tipos morfológicos.

### 2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está localizada en el talud superior del margen continental oriental del GdC, encuadrado entre las coordenadas 36°50' y 35°51' de latitud N y entre 6°18' y 7°0' de longitud (Fig. 1).

El talud superior en el área de estudio está comprendido en un rango batimétrico entre 120-130 m y 450-500 m, presentando una pendiente media de 1,25° (Sánchez-Rubio *et al.*, en este volumen). Hay dos zonas con mayor pendiente, al norte, con un máximo de 4° y una media de 1,5°, y al sur, donde se alcanzan los 12° y la pendiente media aumenta hasta los 2°. La anchura del talud varía entre los 10 y 17 km, siendo en su parte central donde es más ancho. El borde de la plataforma continental es suave prácticamente en todo el área, aunque en la parte sur y en algunos puntos concretos de la parte central es abrupto, con escarpes de 10-25 m de altura. En el talud continental destacan los tipos morfológicos asociados a deformaciones producidas por diapiros aflorantes o subaflorantes, volcanes de fango, escarpes y canales.

En este segmento del talud son significativos los procesos de depósito que originan cuerpos sedimentarios progradantes en situaciones de bajo nivel del mar, especialmente en zonas cercanas a la desembocadura de los grandes ríos como el Guadalquivir y el Guadiana, que produce el crecimiento de la plataforma hacia zonas más profundas. Sin embargo, en la plataforma al sur de Cádiz, donde predominan los procesos tectónicos, se producen bruscas rupturas de pendiente que favorecen procesos gravitacionales de movimientos en masa (Lobo, 1995). En el GdC existe una elevada tasa de sedimentación detrítica debida a la desembocadura de varios ríos cuyas cuencas drenan grandes áreas de la Península Ibérica y arrastran un gran volumen de material. Debido a su localización geográfica, próxima al Estrecho de Gibraltar, el GdC está fuertemente influenciado por la dinámica marina característica de la zona, quedando ésta dominada por los intercambios, a través del Estrecho de Gibraltar (Ochoa & Bray, 1991), donde el agua atlántica y el agua mediterránea circulan en direcciones opuestas, existiendo una entrada de agua atlántica superficial en el Mar Mediterráneo, y un flujo de agua subsuperficial mediterránea de salida hacia el Atlántico. El área de estudio se encuentra bajo la influencia del Agua Central del Atlántico Norte (NACW) y por el Agua de Salida Mediterránea (MOW) (Fig. 1), cuya interfase se fija entre 400-500 m (Fernández-Salas *et al.*, 2012). Las corrientes de fondo en la zona alcanzan velocidades de hasta 0,45 m/s.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

El presente trabajo se basa en el análisis geoestadístico de las variables morfométricas medidas sobre los canales del talud superior del Golfo de Cádiz y que se detallan en Sánchez-Rubio *et al.* (en este volumen). Concretamente, se ha realizado un

procedimiento de clasificación que permite encontrar clústeres naturales en los datos analizados usando la herramienta *Análisis de agrupamiento o Grouping Analyst*, que viene incorporada en la ventana *ArcToolbox* de *ArcGis 10.2.1*. Esta herramienta trata de buscar una solución en la que todas las entidades dentro de los grupos especificados a priori sean lo más parecidas posible entre ellas, y que los grupos entre sí sean tan diferentes como sea posible.

En este estudio se han usado aquellas variables morfológicas que en un análisis estadístico previo aportaban diferencias significativas, en concreto, se han usado: el orden, el área, la altura media, la anchura media, la relación altura/anchura y la longitud en línea recta de cada uno de los canales.

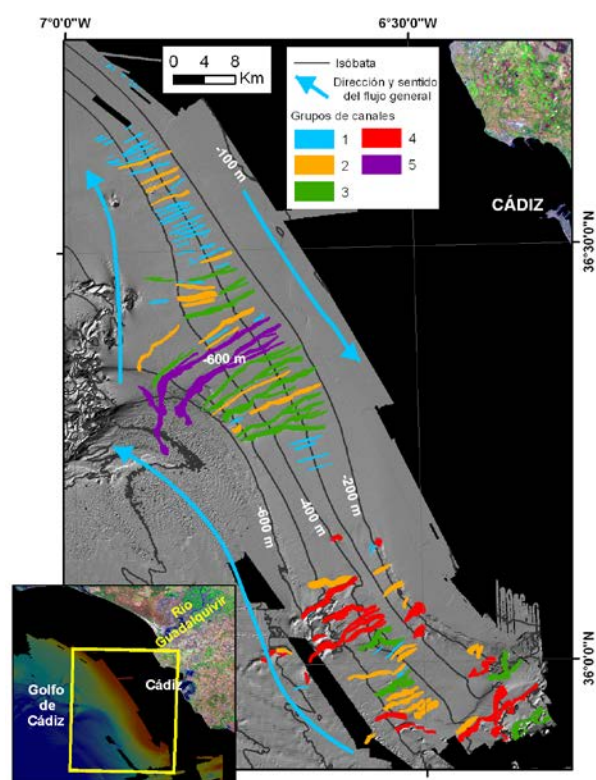


Fig. 1. Localización del área de estudio y distribución espacial de los 5 grupos identificados geoestadísticamente. Las flechas azules indican el patrón principal de las corrientes sobre el fondo.

El análisis de agrupamiento se ha realizado sin restricción espacial, ya que los canales pueden ser similares aunque no compartan bordes o cercanía espacial. Se ha fijado en 5 el número de grupos a utilizar, después de analizar varias opciones evaluando la cantidad óptima de grupos. La eficacia en el agrupamiento se mide mediante el pseudo índice estadístico F Calinski-Harabasz, que es una proporción que refleja la similitud dentro de un grupo y las diferencias entre grupos.

Cuando se ejecuta la herramienta *Análisis de agrupamiento* se calcula un valor  $R^2$  para cada variable. Un valor de  $R^2$  más alto indica que estas

variables son las más eficaces para dividir a las entidades.

La salida predeterminada de la herramienta *Análisis de agrupamiento* es una nueva clase de entidad que contiene los campos que se utilizan en el análisis más uno nuevo que identifica a qué grupo pertenece cada canal.

#### 4. RESULTADOS

Una vez aplicada la herramienta *Análisis de agrupamiento* a las variables especificadas anteriormente se pueden diferenciar 5 grupos de canales (Fig. 1) en el talud superior del Golfo de Cádiz. El grupo 1 se localiza principalmente en la parte norte del área de estudio, el grupo 2 tiene una alta dispersión geográfica, encontrándose prácticamente en todas las zonas del talud superior, el grupo 3 se localiza en la zona central y sur, el grupo 4 se concentra en la parte sur y el grupo 5 se encuentra en la parte central. El Grupo 1 es el grupo más numeroso, con 60 canales, seguido por los grupos 2, 4, 3 y 5, en orden decreciente. A éste último sólo pertenecen 2 canales (Fig. 1).

Atendiendo a la distribución de las variables utilizadas para la segregación de los grupos de canales (Fig. 2), se puede establecer que:

El Grupo 1, son canales de orden 1, cuyos valores de altura, anchura, relación altura/anchura y área son los más bajos de todos los grupos. Por lo tanto, los canales que pertenecen a este grupo son los más pequeños, los menos jerarquizados y los de menor encajamiento.

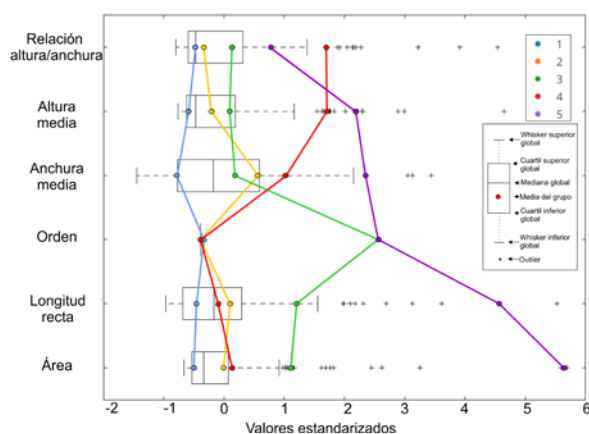


Fig. 2. Valores estandarizados de la media de cada variable para cada uno de los grupos de canales diferenciados. En color negro, se indica un diagrama de caja con los valores estadísticos del conjunto de datos utilizado.

En el Grupo 2, no están jerarquizados, y presentan valores medios prácticamente para todas las variables analizadas.

El Grupo 3, son canales de orden 2, con valores medios de altura, anchura y la relación altura/anchura, aunque algo mayores que el Grupo 2.

Presenta valores bastante altos en cuanto a la longitud y al área.

El Grupo 4, son también canales de orden 1, con un área y longitud de tamaño medio, pero su altura y anchura presentan valores altos, de forma que su relación altura/anchura alcanza los valores máximos de todos los canales estudiados.

El Grupo 5, es un grupo cuyas variables se pueden calificar como *outliers* o extremas. Aunque tienen una relación altura/anchura menor que el grupo 4, y el resto de variables están muy por encima del conjunto de canales analizados.

En cuanto a las variables utilizadas, en la Tabla I, se puede observar como las variables con mayor valor de  $R^2$  son: el orden, el área y la altura de los canales, con valores de 0,93, 0,74 y 0,72, respectivamente.

Tabla I. Resumen de parámetros estadísticos de las variables morfométricas usadas en el Análisis de agrupamiento.

Variable	Media	Dev.Est.	Min	Max	$R^2$
Orden	1,13	0,33	1	2	0,93
Área	2457785,3	3644027,7	41355,6	23206962,3	0,74
H	4,45	5,50	0,25	30,03	0,72
W	418,17	217,35	103,54	1166,07	0,62
H/W	0,009	0,0088	0,0020	0,0487	0,61
Longitud	2922,20	3859,67	199,97	25241,50	0,58

#### 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se pueden establecer dos modelos evolutivos de los canales del talud superior del Golfo de Cádiz, uno para la zona norte y otro para la zona sur. De forma general, el modelo de crecimiento de los canales se produciría aumentando su longitud y su área, de forma más o menos proporcional (Fig. 3).

Para la zona norte, se propone un modelo evolutivo seriado de los grupos 1, 2, 3 y 5. Así, el Grupo 1 representa los canales menos evolucionados, ya que son los menos encajados, los más cortos y los menos jerarquizados. Un segundo paso en la evolución de los mismos lo constituirían los canales del Grupo 2, que aunque no se ramifican, sí se encajan más, ampliando así su área, a medida que aumenta su longitud, en mayor proporción que lo hacen los canales del Grupo 1 (Fig. 3). El siguiente paso evolutivo, se consigue aumentando la ramificación, pasando a canales de orden 2, aumentando así su área y longitud, e igualmente aumenta su índice de encajamiento. Y finalmente, el proceso evolutivo termina con los canales del Grupo 5, que son ejemplos extremos u *outliers* prácticamente en todas las variables medidas, excepto en el índice de encajamiento que se encuentra en el cuarto cuartil de la distribución del área de estudio (Fig. 2). Este modelo evolutivo se podría explicar por la acción de procesos erosivos de flujos de gravedad, continuados en el tiempo e

iniciados en el último máximo glacial, que favorecieron el transporte de sedimentos desde el borde de la plataforma actual hasta el talud superior. La existencia de los canales extremos del Grupo 5 en la parte central de la zona norte, flanqueados por los del grupo 3 (los anteriores en la escala evolutiva), podría explicarse por la cercanía de las desembocaduras de los ríos Guadalquivir y Guadalete, cuando se situaban sobre el borde de la plataforma actual.

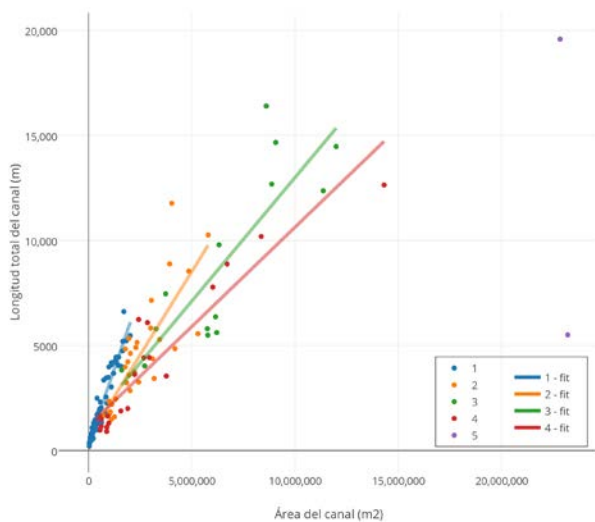


Fig. 3. Gráfico de dispersión de puntos de la longitud total y del área de los canales. Los colores corresponden a los grupos clasificados especificados en la leyenda. Las líneas rectas son los ajustes lineales de los puntos de cada grupo.

Para la zona sur, en la que aparecen los canales del Grupo 4, el modelo evolutivo que se propone sería similar, es decir, siguiendo la serie 1, 2, 3 y 4, siendo los de este último grupo los canales más evolucionados. La pendiente de esta zona es mayor que en la zona norte, y según Lobo (1995), en esta zona se dan procesos gravitacionales en masa. Estas dos características pueden explicar que los canales del grupo 4, sean los más encajados, siendo además los más anchos y altos.

Aunque los datos aportados gozan de una calidad y coherencia suficiente para el planteamiento de estos modelos evolutivos propuesto, consideramos conveniente la realización de un estudio de mayor detalle de cada uno de los canales y aumentar el conocimiento de la estratigrafía sedimentaria de la zona, de forma que se puedan apoyar de manera más

determinante las afirmaciones aquí planteadas. Igualmente, ampliar el conocimiento de la oceanografía del talud continental y su relación con estos tipos morfológicos es un planteamiento que habrá que atender en el futuro inmediato.

#### Agradecimientos

Este estudio se encuadra en el proyecto LIFE+ INDEMARES. Agradecemos la ayuda prestada por los científicos participantes en las campañas INDEMARES-CHICA 1011 y 0412, y ARSA a los capitanes y tripulación del B/O Vizconde de Eza, Ramón Margalef y Miguel Oliver, así como, al Instituto Hidrográfico de la Marina por el procesamiento de los datos batimétricos.

#### REFERENCIAS

- Fernández Salas, L.M., Sánchez Leal, R., Rueda J.L. *et al.* (2012). Interacción entre las masas de agua, los relieves submarinos y la distribución de especies bentónicas en el talud continental del Golfo de Cádiz. *Geo-Temas* 13: 198.
- Gales, J.A., Larter, R.D., Mitchell, N.C. & Dowdeswell J.A. (2013a). Geomorphic signature of Antarctic submarine gullies: Implications for continental slope processes. *Marine Geology*, 337, 112-124
- Gales, J.A., Forwick, M., Laberg, J.S., Vorren, T.O., Larter, R.D., Graham, A.G.C., Baeten, N.J. & Amundsen, H.B. (2013b). Antarctic submarine gullies-A comparison of high latitude continental. *Geomorphology*, 201, 449-461
- García, M., Alonso, B., Ercilla, G. & Gràcia, E. (2006). The tributary valley systems of the Almería Canyon (Alboran Sea, SW Mediterranean): Sedimentary architecture. *Marine Geology*, 226, 207-223
- Lobo, F.J. (1995). Estructuración y evolución morfosedimentaria de un sector del margen continental septentrional del Golfo de Cádiz durante el Cuaternario Terminal. *Tesis de licenciatura*, Univ. Cádiz, 200 pp
- Micallef, A. & Mountjoy, J.J. (2011). A topographic signature of a hydrodynamic origin for submarine gullies. *Geology*, 39, 115-118.
- Ochoa, J. & Bray, N.A. (1991). Water Masses Exchange in the Gulf of Cadiz. *Deep-Sea Research*, 38, Suppl.1, S465-S503.
- Sánchez-Rubio, N., Fernández-Salas, L.M., Vázquez, J.T. *et al.* (en este volumen). Caracterización morfológica de los canales submarinos en el talud superior del Golfo de Cádiz (SO de la Península Ibérica). *Resúmenes sobre el VIII Simposio MIA15*.
- Vachtman, D., Mitchell, N.C., Gawthorpe, R. (2012). Morphologic signature in submarine canyons and gullies, central USA Atlantic continental margins. *Marine and Petroleum Geology*. 41, 250-263.