

Aplicación del análisis textural a datos de retrodispersión de sonda multihaz para la clasificación de fondos marinos

F. Carreño¹, I. López¹, J. Payán¹, C. Arranz¹, E. Castellanos¹

¹ Dpto. de Biología y Geología. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid. España

Resumen

En el presente trabajo se detallan los resultados del análisis de variables texturales aplicada a los datos de retrodispersión de 5 metros de tamaño de píxel tomados con una sonda multihaz EM3000 D para caracterizar y cartografiar los diferentes tipos de fondo marino, que son clave en la interpretación de los procesos geológicos de la plataforma continental de la Región de Murcia.

La extracción de este tipo de información temática se realiza habitualmente aplicando las técnicas de clasificación a los valores de retrodispersión. Los resultados obtenidos con esta metodología muestran errores importantes en la asignación válida de clases debido a que se trabaja con una única banda, a la propia geometría de adquisición de datos y a los cambios constantes en las variables ambientales durante la toma de la información. En este trabajo se han aplicado técnicas de análisis textural de la componente espectral de la retrodispersión para identificar diferentes tipos de fondos marinos, que se pueden utilizar bien individualmente o como nuevas bandas a considerar en las clasificaciones supervisadas.

Los resultados muestran que el análisis textural aplicando filtros estadísticos y matrices de ocurrencias y co-ocurrencias de niveles de grises, mejora notablemente la identificación de las clases de fondo marino. De todas las variables texturales, las variables de co-ocurrencia de la Media y Homogeneidad son las que mejor información aportan para determinar los límites de cada clase de sedimentos marinos.

Palabras clave: Análisis textural, matriz de ocurrencia, matriz de co-ocurrencia, retrodispersión, ecosonda multihaz, plataforma continental española

Abstract

Application of texture analysis of multibeam backscatter data for seabed classification

In this work we present the results of the textural analysis of seafloor reflectivity data (5 meters/pixel resolution) obtained with a EM3000D multibeam. These backscatter values are used to map different materials on the seafloor and are a key dataset to the study and interpretation of the geologic processes that take place and shape the continental shelf in the Murcia Region (SE of Spain).

Extraction of this type of thematic information is being carried out by applying different classification procedures to the reflectivity values. The results obtained through this working procedure show errors in the class assignment during classification due to: a) use of an unique band, b) acquisition geometry of the data and c) change of environmental variables during data acquisition. We apply different techniques of textural analysis to the spectral component of the reflectivity to identify different types of seafloor materials. These new datasets can be used as new bands and be used in later supervised classifications.

The results of this work show that textural analysis carried out using statistical filters and matrices of occurrences and co-occurrences improve the classification of the different textural classes in the seafloor obtained and help to identify other classes that were not possible to differentiate with the original data. Textural variables co-occurrence of the Media and Homogeneity are best because allow to better determine the boundaries of each class of marine sediments

Key words: texture analysis, occurrence matrix, co-occurrence matrix, backscattering, Multibeam echosounder, continental shelf.

* Autor para la correspondencia: francisco.carreno@urjc.es

Recibido: 08-03-10; Aceptado: 17-11-11.

Introducción

El proyecto ESPACE (Estudio de la plataforma continental española) que lo desarrolla la actual Secretaría General del Mar (Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino) desde el año 1999, y desde el año 2005, con el asesoramiento científico al proyecto a través de un convenio con el grupo de Geología de la Universidad Rey Juan Carlos, tiene como objetivo básico adquirir información detallada y sistemática de los fondos marinos desde la línea de costa (sobre los 8 a 10 m) hasta los 120 a 180 m de profundidad, con técnicas geofísicas de alta resolución (sonda multihaz y sonda paramétrica), así como con técnicas directas (muestreos y buceo), utilizando una metodología con unos estándares estrictos para la captura, identificación, organización y procesado de los datos, hasta su incorporación a un SIG (Sanz, 2009).

Una de las múltiples aplicaciones de esta base cartográfica del proyecto ESPACE es la interpretación de los procesos geológicos a partir del análisis de datos del fondo marino con diferentes características de formas, texturas, batimetría y tono. Las formas identificadas a partir de los modelos digitales de profundidad (MDP) y de sus productos topográficos (batimetría, sombreados, orientaciones, pendientes) permiten obtener una primera aproximación de la geología de la zona que no resulta completa sin la caracterización de los materiales y sedimentos del fondo marino (Mitchell and Hughes, 1994). Para conocer las características de estos materiales, tradicionalmente se han utilizado metodologías basadas en la batimetría (eg. Herzfeld, 1993), y en imágenes de barrido lateral y multihaz (eg. Iacono *et al.*, 2008) que es la técnica que mejores resultados está obteniendo.

Las sondas multihaz miden la proporción de energía retrodispersada que previamente emite el propio sistema. El funcionamiento general de esta técnica de teledetección marina se basa en emitir una onda de presión desde un emisor para que choque con la superficie de estudio y vuelva al sistema emisor. Es importante atender a parámetros como la velocidad del sonido en el medio, que se ve influenciada por factores como la temperatura, la salinidad

y la presión. También se pueden producir absorciones y reverberaciones que distorsionen la señal, a lo que debemos sumar errores muy difíciles de evitar como el ruido de las máquinas del barco o las interferencias generadas por el propio movimiento de éste sobre la superficie del mar (Rønhovde, 1999).

Los registros de la ecosonda son generalmente empleados para detectar accidentes y para proporcionar la información para la clasificación de fondos marinos. En estos sistemas, además de interpretar la imagen de retrodispersión del haz de la sonda, como en el caso del sonar de barrido lateral, también adquieren datos de batimetría, lo que supone un ahorro de tiempo y recursos frente al empleo de los sistemas clásicos. De esta forma se pueden combinar los datos de profundidad (batimetría) y el ángulo del haz (retrodispersión), obteniendo imágenes de estas características, con una corrección geométrica real (Bureau Hidrográfico Internacional, 2005). Combinando estos dos factores se puede obtener una clasificación simple de las características de los fondos marinos, siendo mucho más efectivos cuando se consideran de forma conjunta que por separado (Mitchell y Hughes, 1994).

Aunque parte de la retrodispersión medida depende de la instrumentación y de factores físicos, como los filtros utilizados, la dirección y ángulo de incidencia del haz y la densidad del agua (Blondel y Murton, 1997); ésta es realmente controlada por las características del fondo marino como variaciones en la pendiente, ratios de densidad agua/sedimentos, tipos de sedimentos y rugosidad del terreno, o las heterogeneidades del volumen subsuperficial (Jackson *et al.*, 1986). Hay numerosos estudios que establecen una relación entre el valor de retrodispersión de la sonda multihaz con el tamaño y las características físicas de los sedimentos (Goff *et al.*, 2000; Urgeles *et al.*, 2002; Nitsche *et al.*, 2004; Medialdea *et al.*, 2008) pero no es fácil discriminar la contribución en las variaciones de los valores de cada una de las características del fondo marino.

Con esta información se puede estudiar la rugosidad del fondo marino, con estructuras como los ripples, o bien obtener variables físicas de los sedimentos superficiales como la textura, la compactación, la densidad, la poro-

sidad, etc. que están relacionadas entre sí (Medialdea *et al.*, 2008; Lynn y Flood, 2006). También se pueden detectar numerosos procesos geodinámicos, como los involucrados en la formación de deltas submarinos (prodeltas) en las desembocaduras de los ríos, y gracias a éstos, poder evaluar los procesos que ocurren a lo largo de ellos (Lobo *et al.*, 2006). Otra aplicación es el estudio de los procesos hidrodinámicos que actúan en el transporte y deposición de partículas mediante corrientes marinas, como las que atraviesan el estrecho de Gibraltar (Hanguiez *et al.*, 2007).

Se están desarrollando técnicas de procesamiento de los datos de las sondas multihaz que permitan detectar desde presencia de residuos orgánicos antropogénicos hasta carbonatos relacionados con la oxidación bacteriana del metano (Medialdea *et al.*, 2008). Aun así, no es sencillo saber la contribución de cada uno de los elementos a las variaciones en la señal de retrodispersión, sobre todo si suceden simultáneamente varios procesos de los anteriormente citados (Lo Iacono *et al.*, 2008).

La cartografía de calidad del fondo marino se obtiene fundamentalmente a partir de la información que proporciona la imagen de retrodispersión acústica monobanda, y por tanto, presenta el inconveniente de la falta de otras bandas para discriminar adecuadamente las clases temáticas planteadas con la precisión y fiabilidad requerida.

En este trabajo se ha realizado un análisis textural que mide la variación espacial del contraste entre valores de retrodispersión de píxeles vecinos, esto es la variabilidad local de la retrodispersión dentro de una unidad que a mayor escala se puede considerar como homogénea para obtener nuevas bandas que describan propiedades como la Varianza, Media, Entropía, etc., y que se puedan utilizar individualmente o combinadas con otras bandas para cartografiar e interpretar los fondos marinos a partir de datos de sonda multihaz.

Datos y metodología

El estudio se realizó en el tramo de la plataforma continental española de la Región de Murcia comprendida entre los municipios de

La Torre (Alicante) y Águilas (Murcia). Esta zona del SE de la Península Ibérica se encuentra en un lugar muy importante en el Mediterráneo Occidental, ya que es una zona intermedia entre el mar de Alborán, con características atlánticas, y el resto de cuencas mediterráneas, que presentan unas características más mediterráneas (Mas, 1996). La plataforma continental de la zona de estudio presenta diferencias en cuanto a su extensión de N a S, siendo más extensa entre los cabos de La Nao y Palos, que entre el Cabo de Palos y Almería (Rey y Díaz del Río, 1983). Entre el cabo de Palos y Almería hay una alternancia entre zonas de sedimentación carbonatada y zonas de sedimentación silicoclástica, aunque hay un claro predominio de las primeras. En la zona hay un recubrimiento sedimentario muy escaso e irregular debido a que el sustrato rocoso aflora muy próximo a la superficie del fondo. En el litoral encontramos estructuras terrígenas que se van sustituyendo por arenas en la plataforma interna, fangos arenosos en la plataforma media, y fangos terrígenos en la plataforma externa y borde del talud (Mas, 1996). Entre los cabos de La Nao y Palos encontramos mayores extensiones de afloramientos rocosos, más concretamente en las barras consolidadas aflorantes situadas en la plataforma continental frente al Mar Menor que están relacionadas con migraciones de la línea de costa (Mateu *et al.*, 1984). En definitiva es una zona con diferentes características sedimentológicas y morfológicas que implica gran variedad de fondos a estudiar (Ruiz Fernández, 2005).

Para este trabajo se han utilizado datos del proyecto ESPACE facilitados y publicados por la Secretaría General del Mar del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino que se detallan a continuación:

— Información obtenida con técnicas geofísicas (profundidad y retrodispersión del fondo marino) empleando una ecosonda multihaz dual de alta resolución EM3000 D.

— Muestreo de sedimentos superficiales con dragas, análisis granulométrico de las muestras y tratamiento estadístico de los resultados.

— Transectos submarinos con fotos, video y visu, para la caracterización bionómica en detalle.

Estos datos se han implementado en una herramienta SIG para visualizar, generar modelos 3D, analizar y obtener los documentos cartográficos cuyo contenido final se compone de:

— Modelo digital de profundidades (MDP), obtenido a partir de los datos de la ecosonda, debidamente corregidos y filtrados con el programa Neptune. La resolución de este grid con la profundidad del fondo marino es de 5×5 m.

— Curvas de batimetría interpoladas a partir del MDP con equidistancia de 2 m.

— Sombreado de profundidades derivado a partir del MDP y resolución de 5×5 m.

— Modelo de pendientes derivado a partir del MDP y resolución de 5×5 m.

— Retrodispersión del fondo marino obtenido a partir de los datos de la ecosonda, debidamente corregidos y filtrados con el programa Neptune. La resolución de este grid de retrodispersión del fondo marino es de 5×5 m.

— Características de textura derivadas de matrices de ocurrencia y co-ocurrencias de niveles de gris de la retrodispersión del fondo marino.

— Muestreo de sedimentos generado a partir de la base de datos con los resultados del muestreo y análisis granulométrico de la toma de muestras. Este nivel de información muestra en cada punto, la distribución de las diferentes clases granulométricas obtenidas.

— Transectos submarinos generados a partir de la base de datos que establece las poblaciones de las diferentes unidades bionómicas consideradas.

En el análisis textural se han aplicado matrices de ocurrencia y co-ocurrencia (Tabla 1). Respecto a la matriz de ocurrencia, mide el número de veces que aparecen los niveles de gris en la ventana de procesado para el cálculo de las variables texturales (Anys *et al.*, 1994) y para este trabajo se han calculado intervalo de valores de Entropía, Media, Variancia, y Sesgo para ventanas de 3×3, 5×5, 7×7. Por otro lado, el método de la co-ocurrencia representa los cambios en la distribución de intensidades o niveles de gris de una imagen y cuyos elementos $P(i, j)$ indican la frecuencia con la que dos niveles de gris i y j se dan en la imagen, tomando los píxeles dos a dos y separados una distancia D según una determinada dirección (Haralick *et al.*, 1973). Para este

Tabla 1. Ecuaciones de las variables texturales co-ocurrencia

Variable textural	Ecuación
Media	$\sum_{i,j} p_{i,j}^2$
Varianza	$\sum_{i,j} p(i, j)(i - j)^2$
Homogeneidad	$\sum_{i,j} \frac{p(i, j)}{1 + i - j }$
Contraste	$\sum_{i,j} p(i, j)(i - j)^2$
Disimilaridad	$\sum_{i,j} p_{i,j} i - j $
Segundo Momento Angular	$\sum_{i,j} p(i, j)^2$
Correlación	$\sum_{i,j} \frac{(i - u)(j - u)p_{i,j}}{\sigma^2}$
Entropía	$\sum_{i,j} -p_{i,j} \ln(p_{i,j})$

análisis se han calculado los descriptores de variables de Media, Varianza, Homogeneidad, Contraste, Disimilaridad, Segundo Momento Angular, Correlación y Entropía, aplicando ventanas de 3×3, 5×5, 7×7, y desplazamientos variables de las ventanas en la horizontal y vertical de 1 a 9.

Se han considerado las siguientes categorías de sedimentos del fondo marino, atendiendo a su tamaño de grano: roca y gravas, arenas gruesas, arenas medias, arenas finas, y fango. Para identificar en la imagen las categorías mencionadas se ha contado con el trabajo de campo consistente en muestras de sedimentos analizadas y localizadas en el fondo marino con un sistema de posicionamiento global con corrección de señal diferencial (dGPS). Se han seleccionado polígonos que engloban aquellos píxeles que estando próximos a las muestras presentan los valores más homogéneos posibles, tanto de retrodispersión como de las variables texturales consideradas, teniendo presente que al utilizar éstas variables hay errores significativos en las zonas de frontera entre clases (Ferro y Warner, 2002).

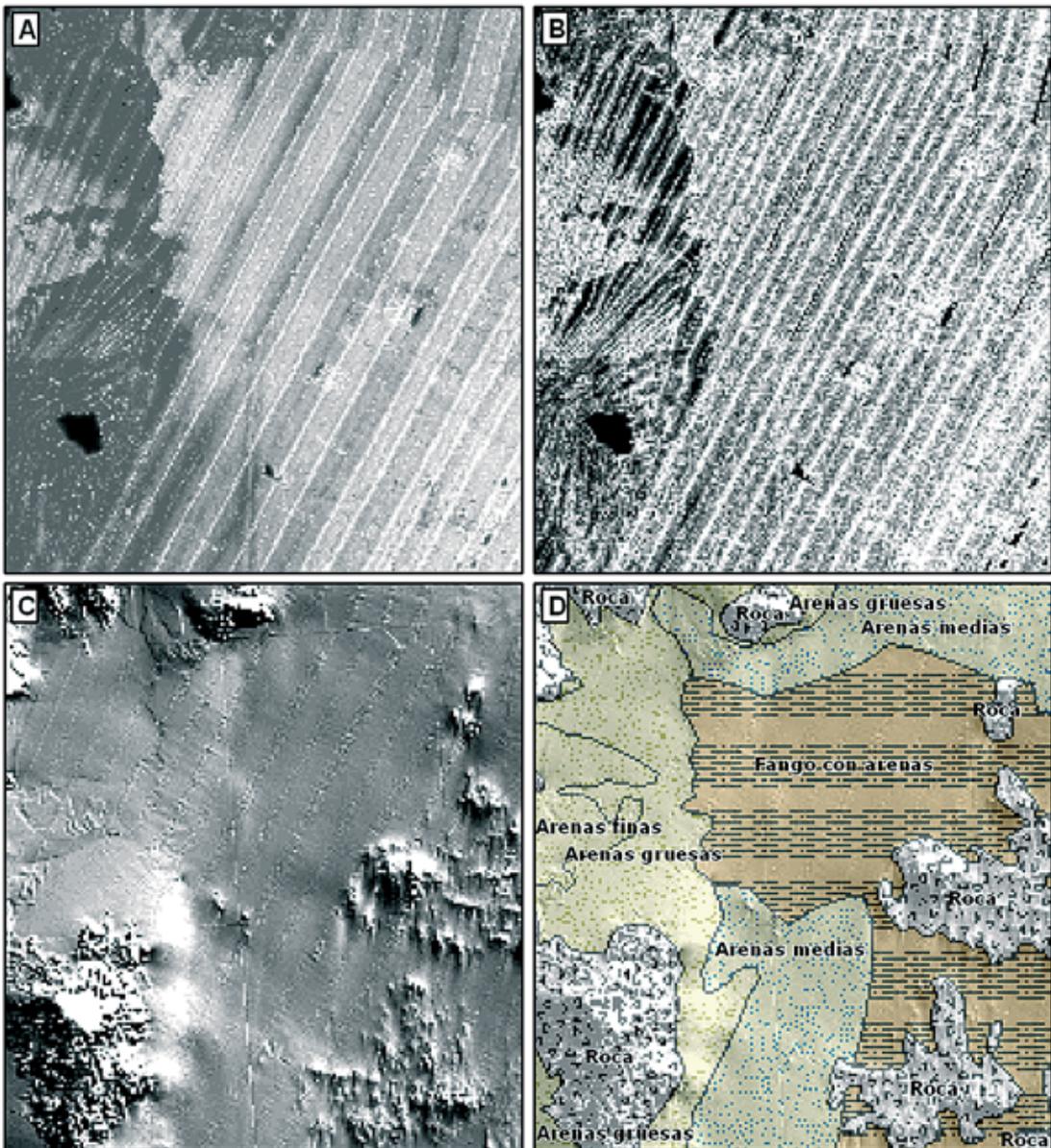


Figura 1. Arriba izquierda, imagen de retrodispersión de una de las zonas de estudio en niveles de gris. Arriba derecha, variable textural de co-ocurrencia Entropía obtenido de la imagen de retrodispersión en la que se definen nuevos bordes que corresponden a límites de tipos de sedimentos. Abajo izquierda, sombreado obtenido a partir del Modelo Digital de Profundidades (MDP) con el que se identifican bien los afloramientos rocosos y algunos límites de clases. Abajo derecha, ejemplo de la cartografía final interpretada del fondo marino.

Para llevar a cabo la interpretación y cartografía final de los procesos geológicos de la plataforma continental en la zona de estudio, se ha tenido en cuenta la información integrada en la base de datos espacial, pero en las que tiene un papel importante la información derivada de las variables texturales extraídas de la retrodispersión, las clasificaciones realizadas, los diferentes modelos topográficos (en espe-

cial los sombreados con diferentes parámetros), la batimetría, y el contexto geológico de la zona (Figura 1).

Resultados

En cuanto a los valores originales de retrodispersión para toda la zona de estudio varían

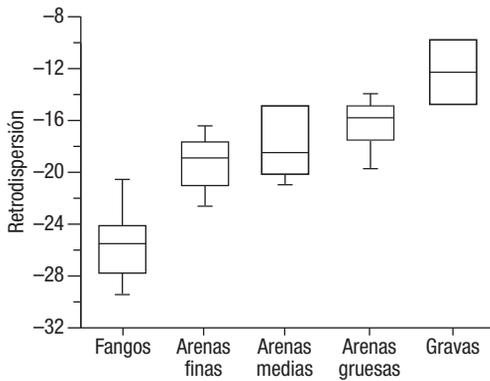


Figura 2. Valores de retrodispersión de las clases de fondos marinos: Fangos, Arenas finas, Arenas medias, Arenas gruesas y Gravas.

entre -10 dB y -40 dB. y son coherentes con los de otros autores (Hughes Clarke *et al*, 1996; Mitchel y Clark, 1994). Los valores más altos corresponden a los afloramientos rocosos y gravas (entre -10 dB y -14 dB), los primeros perfectamente identificables con el modelo de sombreado. Las fracciones arenosas tienen valores típicos en un intervalo de retrodispersión más amplio (-15 dB y -32 dB) en el que se incluyen sedimentos de arenas gruesas (entre -15 dB y -19 dB), arenas medias (entre -20 dB y -23 dB) y arenas finas (entre -25 dB y -32 dB). Por último, los términos fangosos presentan los valores más bajos de energía (entre -33 dB y -39 dB).

En la Tabla 2 se muestran los valores medios y desviación estándar de los valores originales de retrodispersión y de cada variable textural correspondientes a las muestras de sedimentos más homogéneos en cuanto a tamaño de grano que se han considerado en este trabajo (Tabla 1).

En el caso de las muestras seleccionadas para nuestro estudio, los valores siguen la tendencia y separabilidad de tipos de fondos marinos pero en general con valores de retrodispersión más altos (Figura 2). Existe una clara relación entre tamaño de grano y valores de retrodispersión, de tal modo que a mayor tamaño de grano mayor valor de retrodispersión. Mientras que las gravas presentan valores similares a los encontrados en la bibliografía (-10 dB y -15 dB), los fangos presentan los valores más bajos (-20 dB y -29 dB) bien diferenciados del resto de clases de fondo marino.

Las arenas siguen la tendencia pero hay grandes solapes de valores de reflectividad entre las diferentes clases (-14 dB y -22 dB) con medias similares entre las arenas finas y medias; $-18,92$ dB y $-18,45$ dB, respectivamente.

Una vez extraídas las variables texturales de la imagen de retrodispersión se realizó el análisis e interpretación visual de los resultados ya que es la metodología que se usa habitualmente para elaborar cartografía de fondos marinos a partir de valores de retrodispersión. Con este análisis se quiso tener una primera aproximación visual para distinguir diferentes estructuras y tipos de fondos marinos de la zona tras aplicar cada una de las matrices de co-ocurrencia, y las variaciones existentes entre ellas.

La característica visual más destacable de estas imágenes es la presencia del ruido que genera un bandeo artificial según la dirección de la trayectoria del barco debido al error total propagado inherente a la propia técnica de adquisición desde el barco y la toma de datos en el muestreo. Las condiciones de adquisición de datos y su posterior procesado también generan zonas sin datos debido a las regiones en sombra en la cobertura de las eco-sondas y a la limpieza línea por línea de los datos originales (Figura 3).

Análisis visual de las variables texturales

A priori, no hay variables texturales concretas que sean de mayor utilidad ya que la textura es una variable específica para cada imagen y muchas de las medidas están correlacionadas entre sí, con lo que en realidad, existen pocas verdaderamente independientes. Los buenos resultados obtenidos en una imagen no implica que puedan ser aplicados de modo general, y por tanto, la selección de las variables texturales adecuadas debe basarse en el análisis interactivo de los resultados para cada imagen particular (Franklin, 2001).

Presutti (2001) propone realizar el análisis visual para determinar la medida textural idónea y el mejor tamaño de nuestra ventana para cada imagen y aplicación concreta. En este trabajo, las imágenes de todas las matrices texturales obtenidas han aportado, en mayor o me-

Tabla 2. Media (X) y desviación típica (DT) de cada uno de los análisis texturales para cada clase de sedimentos: fangos, arenas medias, arenas gruesas y gravas

Muestra	Retro-dispersión		V.T. media		V.T. homogeneidad		V.T. segundo momento	
	X	DT	X	DT	X	DT	X	DT
Fangos								
M181	-27,80	1,05	51,77	0,29	0,70	0,09	0,30	0,08
M017	-25,06	1,69	53,25	0,50	0,40	0,17	0,11	0,04
M318	-25,64	1,72	58,09	0,32	0,61	0,12	0,28	0,09
M138	-20,62	1,31	59,46	0,32	0,59	0,16	0,39	0,13
M291	-24,27	1,93	58,54	0,15	0,64	0,10	0,22	0,03
M264	-25,56	1,21	52,80	0,61	0,53	0,14	0,21	0,07
Media	-25,31	1,50	55,67	0,32	0,60	0,13	0,25	0,07
Max	-20,62	1,93	59,46	0,61	0,70	0,17	0,39	0,13
Min	-27,80	1,05	51,77	0,15	0,40	0,09	0,11	0,03
Ds	2,37	0,34	3,40	0,16	0,10	0,03	0,10	0,04
Arenas finas								
Muestra	X	DT	X	DT	X	DT	X	DT
M093	-22,62	1,22	54,38	0,42	0,75	0,06	0,30	0,08
M180	-18,50	1,74	55,93	2,06	0,72	0,06	0,21	0,06
M231	-17,60	1,74	56,90	0,71	0,54	0,09	0,17	0,05
M237	-19,34	1,30	55,55	1,52	0,58	0,11	0,16	0,04
M105	-16,43	1,99	57,45	0,90	0,41	0,18	0,16	0,05
M297	-21,07	1,54	58,98	0,55	0,50	0,06	0,32	0,09
Media	-18,92	1,64	56,42	0,81	0,56	0,08	0,19	0,05
Max	-16,43	1,99	58,98	2,06	0,75	0,18	0,32	0,09
Min	-22,62	1,22	54,38	0,42	0,41	0,06	0,16	0,04
Ds	2,27	0,29	1,61	0,64	0,13	0,05	0,07	0,02
Arenas medias								
Muestra	X	DT	X	Dt	X	DT	X	DT
M076	-17,81	1,61	56,58	0,83	0,69	0,09	0,20	0,05
M065	-19,10	1,45	56,12	0,58	0,54	0,17	0,21	0,08
M059	-20,93	1,49	55,17	0,58	0,41	0,13	0,14	0,05
M030	-14,87	1,49	60,88	0,21	0,71	0,20	0,46	0,21
M031	-14,88	1,55	60,87	0,23	0,69	0,19	0,39	0,17
M096	-20,16	3,03	55,51	1,58	0,37	0,14	0,16	0,08
Media	-18,45	1,52	56,35	0,58	0,61	0,15	0,20	0,08
Max	-14,87	3,03	60,88	1,58	0,71	0,20	0,46	0,21
Min	-20,93	1,45	55,17	0,21	0,37	0,09	0,14	0,05
Ds	2,61	0,62	2,64	0,51	0,15	0,04	0,13	0,07
Arenas gruesas								
Muestra	X	DT	X	DT	X	DT	X	DT
M085	-16,56	1,07	57,45	0,23	0,66	0,09	0,24	0,03
M182	-16,31	1,21	57,40	0,77	0,66	0,09	0,25	0,09
M178	-14,94	1,33	58,27	0,33	0,68	0,07	0,23	0,05
M223	-14,09	1,47	58,43	0,53	0,48	0,05	0,12	0,02
M035	-14,87	1,45	60,89	0,22	0,80	0,05	0,48	0,08
M107	-15,40	3,49	57,91	1,63	0,41	0,16	0,13	0,06
M003	-17,46	1,45	56,92	0,56	0,56	0,10	0,20	0,06
Media	-15,86	1,45	58,09	0,43	0,66	0,09	0,24	0,06
Max	-14,09	3,49	60,89	1,63	0,80	0,16	0,48	0,11
Min	-19,80	1,07	56,92	0,22	0,41	0,05	0,12	0,02
Ds	1,82	0,77	1,30	0,47	0,13	0,04	0,13	0,03

Tabla 2 (cont.). Media (X) y desviación típica (DT) de cada uno de los análisis texturales para cada clase de sedimentos: fangos, arenas medias, arenas gruesas y gravas

Muestra	Retro-dispersión		V.T. media		V.T. homogeneidad		V.T. segundo momento	
	X	DT	X	DT	X	DT	X	DT
Gravas								
M228	-12,95	1,58	59,17	0,29	0,59	0,12	0,17	0,06
M022	-14,75	1,59	58,31	0,54	0,59	0,10	0,19	0,04
M166	-11,62	0,95	59,25	1,01	0,28	0,10	0,11	0,02
Media	-25,31	1,50	55,67	0,32	0,60	0,13	0,25	0,07
Max	-20,62	1,93	59,46	0,61	0,70	0,17	0,39	0,13
Min	-27,80	1,05	51,77	0,15	0,40	0,09	0,11	0,03
Ds	2,37	0,34	3,40	0,16	0,10	0,03	0,10	0,04

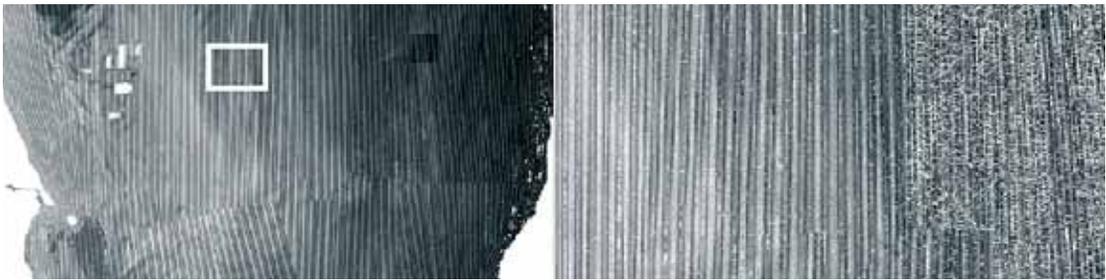


Figura 3. Detalle de la retrodispersión en la zona de estudio (izquierda), indicándose la zona donde se ha realizado la ampliación (derecha).

nor medida, información útil e interpretable para la clasificación de los fondos marinos, pero hemos centrado el estudio en el análisis de los descriptores de segundo orden: Media, Homogeneidad (peso de la ecuación relacionado con la distancia a la diagonal) y Segundo Momento Angular (peso de la ecuación relacionado con la probabilidad) con un tamaño de ventana 7×7 y un desplazamiento D de 3 y 3 porque son los que mejores resultados visuales se obtuvieron.

En la variable textural de la Media, visualmente no se observan modificaciones apreciables con respecto a la original, pero sí se aprecia un suavizado y difuminado de las formas al aumentar el tamaño de ventana que no altera mucho la visualización general. Por lo tanto, esta banda sólo resulta interesante para mejorar visualmente la imagen porque rellena huecos de información pero sin llegar a resaltar las estructuras del fondo marino.

Al aumentar el tamaño de ventana en la variable textural de la Homogeneidad, también se pudo apreciar un suavizado en las formas al igual que en el caso de la variable textural de

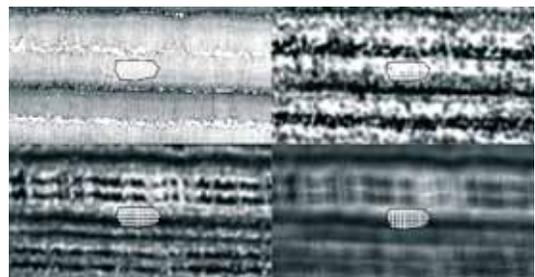


Figura 4. Arriba izquierda, imagen de retrodispersión original. Arriba derecha, filtro textural Homogeneidad para ventana 3×3 y desplazamiento 1,1. Abajo izquierda, filtro textural Homogeneidad para ventana 3×3 y desplazamiento 1,9. Abajo derecha, filtro textural Homogeneidad para ventana 7×7 y desplazamiento 1,9.

la Media, de tal forma que se pierde capacidad para detectar los bordes texturales. Hay que resaltar las grandes diferencias en los resultados al variar las componentes del desplazamiento en la ventana (D), en relación al bandeo sistemático que presentan las imágenes originales (Figura 4).

Sin embargo, cuando se aumenta el tamaño de la ventana en la variable textural del Se-



Figura 5. Arriba izquierda, filtro textural del Segundo Momento Angular para ventana 3x3 y desplazamiento 1,1. Arriba derecha, filtro textural del Segundo Momento Angular para ventana 3x3 y desplazamiento 1,9. Abajo izquierda, filtro textural del Segundo Momento Angular para ventana 7x7 y desplazamiento 1,1. Abajo derecha, filtro textural del Segundo Momento Angular para ventana 7x7 y desplazamiento 1,9.

gundo Momento Angular (Figura 5), si se observa un realce de los bordes entre regiones que no se discriminaban en los casos anteriores. Al igual que en el caso de la variable textural de la Homogeneidad, la dirección de desplazamiento determina el resultado, de tal modo que desplazamientos de la ventana paralelos al bandeo realzan mejor los bordes texturales de las clases de sedimentos marinos.

Con respecto al resto de matrices no consideradas de ocurrencia (Entropía, Media, Variancia, y Sesgo), y co-ocurrencia (Varianza, Contraste, Disimilaridad, Correlación y Entropía) no resultan variables texturales indicadas para las imágenes de retrodispersión de fondo marino de este estudio, ya que tras realizar su inspección visual aportan poca información de interés.

Análisis de valores texturales

Una vez que se analizaron visualmente las variables de modo iterativo junto al resto de datos del proyecto SPACE (modelos digitales del terreno, batimetría, muestreos de sedimentos, transectos submarinos, etc.) para seleccionar las que mayor información aportan, se procedió a la evaluación estadística de las muestras de entrenamiento para cada clase de sedimento marino. Para ello se utilizaron diagramas donde se analiza la separabilidad y valores característicos de las variables texturales

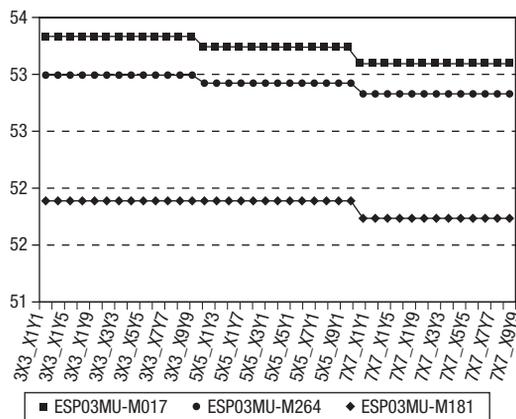


Figura 6. Valores texturales de la variable textural de la Media para diferentes tamaños de ventanas y desplazamientos variables.

consideradas de la Media, Homogeneidad y Segundo Momento Angular.

Como se puede apreciar en la gráfica de la Figura 6, el valor textural Media de las muestras disminuye al aplicar tamaños de ventana mayores pero dentro de un mismo tamaño de ventana se mantiene constante para todos los desplazamientos. Esto indica que el valor textural de la Media para estas imágenes está determinado por el tamaño de la ventana que se aplica y no tanto por el desplazamiento y su orientación. Esto se puede deber a la abundante presencia de zonas sin registros de retrodispersión en este tipo de imágenes de tal modo que al aumentar el tamaño de ventana (7x7) disminuye el valor textural Media al incluirse píxeles sin valor en la matriz de cálculo.

En el caso de la variable textural de la Homogeneidad (Figura 7), a mayor distancia de desplazamiento, tanto en la componente X, como en la Y, como en ambas, resultan valores texturales más bajos (entre 0,2 y 0,4). Sin embargo, el tamaño de la ventana apenas modifica los valores con respecto a otro tamaño de ventana. Distintos tamaños de ventana con iguales desplazamientos resultan valores texturales de Homogeneidad similares.

En el caso del Segundo Momento Angular (Figura 8) los valores texturales disminuyen una media de 0,2 a medida que aumenta el tamaño de la ventana (3x3_X1Y1 a 7x7_X9Y9). A diferencia de las variables texturales de Me-

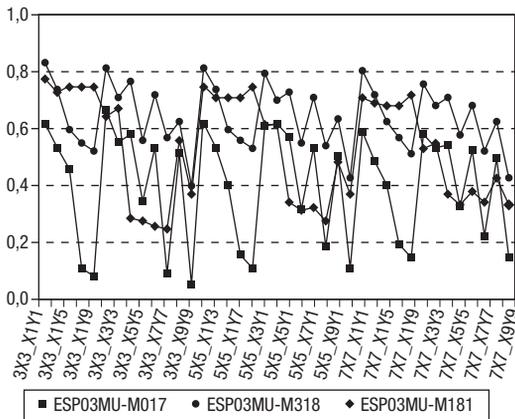


Figura 7. Valores texturales de la variable textural de la Homogeneidad para diferentes tamaños de ventanas y desplazamientos variables.

dia y Homogeneidad, los mínimos dentro de una misma ventana coinciden con las mayores diferencias entre la componente X e Y (X1Y9 y X9Y1).

Resultan especialmente interesantes los resultados obtenidos en el procesado de las imágenes de reflectividad de ecosondas ya que dependiendo el tipo de tratamiento de análisis textural aplicado y las variables texturales los efectos dentro de una misma imagen son diferentes. Al aumentar el tamaño de ventana en la variable Homogeneidad se produce una atenuación en las diferencias de los valores con un efecto de suavizado de los bordes de clases en la imagen. En el caso de la variable textural del Segundo Momento Angular según aumenta el tamaño de la ventana y las distancias de desplazamiento, se produce una generalización de los valores, según nos encontremos en la zona central o en los bordes de las franjas de adquisición de los datos.

Análisis de las clases de fondo marino

Contrastando los valores originales de retrodispersión con los valores texturales de las categorías de fondos marinos se puede analizar su separabilidad. En la Figura 9 se observa que los valores texturales de la Media frente a los valores originales de retrodispersión son los que mejor definen los espacios característicos de cada tipo de fondo marino. En gene-

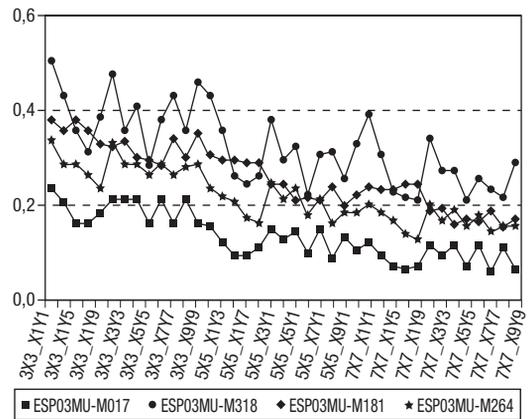


Figura 8. Valores texturales de la variable textural del Segundo Momento Angular para diferentes tamaños de ventanas y desplazamientos variables.

ral, la separabilidad entre los valores texturales de las clases generales (fangos, arenas, cantos y gravas) está bien definida pero se observan solapes entre las diferentes clases de arenas. El valor de la retrodispersión y de la Media aumentan a medida que el tamaño de grano. En los otros gráficos (Retrodispersión/Homogeneidad y Retrodispersión/Segundo Momento) no existe un patrón claro de separabilidad y viene determinado fundamentalmente por los valores originales de retrodispersión.

La separabilidad de clases teniendo en cuenta los valores texturales (Figura 10) no es tan clara como en el caso anterior. Si bien se observa una ligera tendencia en la distribución de las nubes de puntos para las diferentes clases de fondos, más clara en los términos extremos (fangos y gravas) en las nubes de valores, no se puede establecer unos límites definidos para ninguna clase. De las tres posibles combinaciones de valores texturales, donde se produce un menor solape de clases es en la Media-Homogeneidad. En general, los valores de las clases fangos y rocas se identifican mejor que los de las arenas, ya que se pueden considerar como clases más homogéneas y más fácilmente clasificables que las de arenas. Al considerar 3 grupos distintos de arenas puede ocurrir que dichos grupos no sean tan homogéneos en cuanto a la naturaleza y características de los sedimentos y en realidad son clases muy heterogéneas, lo que provoca mayores solapes en sus valores.

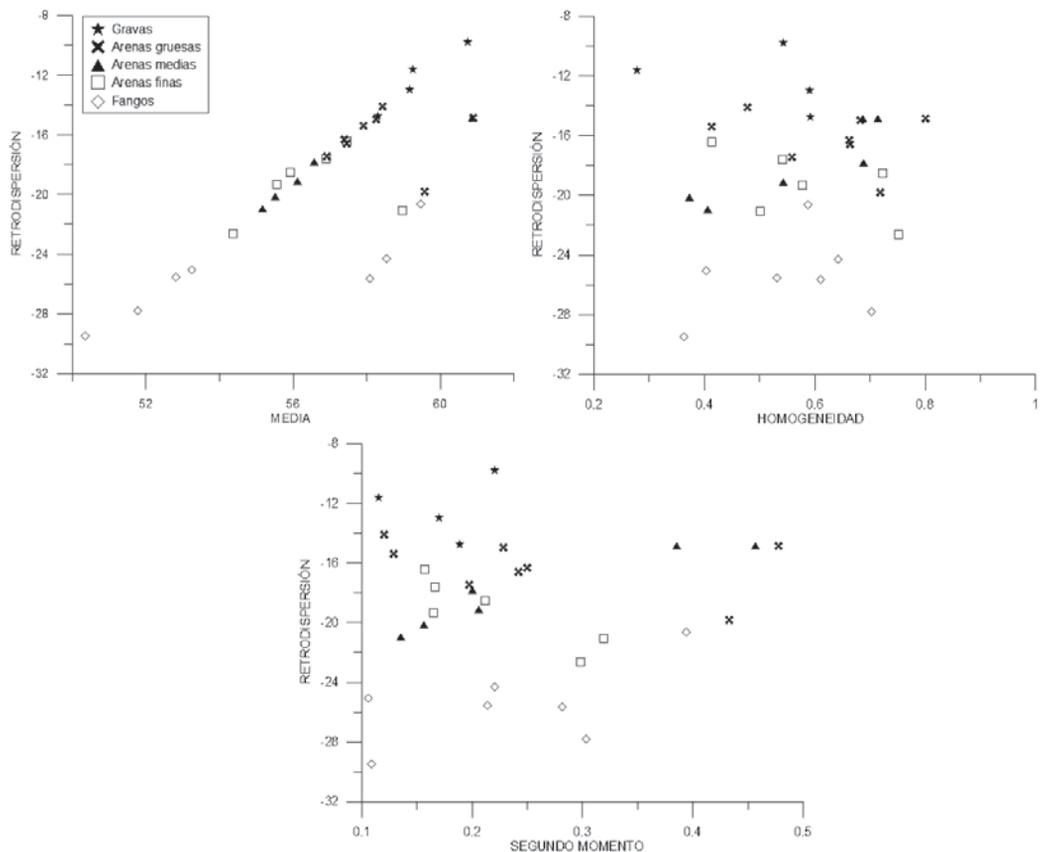


Figura 9. Distribución de valores de las diferentes clases de fondos marinos. Arriba izquierda, retodispersión y variable textural de la Media. Arriba derecha, retodispersión y variable textural de la Homogeneidad. Abajo, retodispersión y variable textural del Segundo Momento angular.

Discusión

El procesado de los datos crudos de una sonda multihaz determina el error total propagado. Según Ponce (2005), el ruido excesivo de los datos multihaz impide el uso de algoritmos que puedan procesarlos de modo eficaz y eficiente para obtener modelos corregidos y válidos.

El análisis textural de primer orden o matriz de ocurrencia, pone de manifiesto que las variables texturales de Media y Varianza no ayudan a la identificación de las clases propuestas, ya que representan en mayor medida las condiciones del proceso de adquisición de la imagen (iluminación, brillo general de la escena o ganancia y desfase del sistema).

Estudios donde se aplica el análisis textural muestran resultados diferentes. Mientras que las variables de Segundo Momento Angular,

Contraste y Correlación son las que se utilizan habitualmente en la clasificación multiespectral (Presutti, 2004), los trabajos de Maillard (2003) afirman que de todas las variables texturales de segundo orden calculadas con la matriz de co-ocurrencia, la variable de Segundo Momento Angular, Entropía y Contraste, son los que mejor información aportan a la hora de clasificar las clases definidas para los fondos marinos. De tal modo que la variable textural Media presenta una correlación significativa con el tamaño de grano ($r = 0.67$), mientras que la Entropía apenas tiene un 0.01 de r . Pero en nuestro caso, la Media y la Homogeneidad son las que mejores resultados nos han aportado, seguramente por las características sedimentológicas y calidad de los datos. El Segundo Momento Angular mide la uniformidad local de los datos y permite utilizar grandes ventanas aunque resta resolución a los límites de las

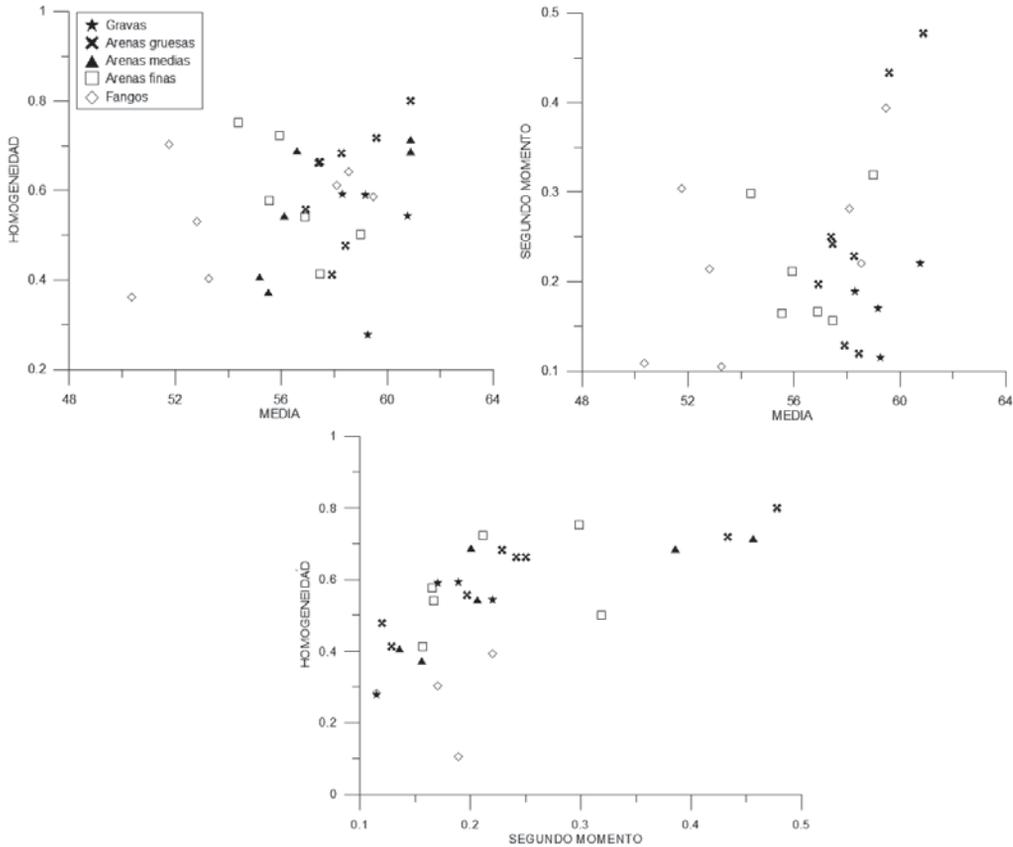


Figura 10. Distribución de valores texturales de las diferentes clases de fondos marinos. Arriba izquierda, variable textural de la Homogeneidad frente a la variable textural de la Media. Arriba derecha, variable textural del Segundo Momento Angular frente a la variable textural de la Media. Abajo, variable textural de la Homogeneidad frente a la variable textural del Segundo Momento Angular.

clases de fondos marinos, enmascarando sus fronteras, y por tanto, dificultando las clasificaciones.

Era de esperar que la medida de la variable textural de la Entropía hubiera aportado buenos resultados puesto que mide la probabilidad de que se produzca la ocurrencia de cada combinación de píxeles. El ya comentado bandeo sistemático de las imágenes hace que se introduzca un ruido con un peso importante que no permita caracterizar bien las diferentes clases de fondo marino, tal y como se vio en el análisis visual de esta variable.

En cuanto al análisis visual de la variable textural de la Media, se comprobó que sólo existían variaciones en la visualización tras modificar el tamaño de ventana. Al aumentar el tamaño de ventana, se incrementaba también la desviación estándar debido seguramente a que toman valores sin valor de los píxeles nulos del

bandeado cercanos a los polígonos. En algunos casos, siendo incluso mayor dicha desviación que para la retrodispersión de la imagen original. Esto hace tener en cuenta de modo especial que obliga a escoger adecuadamente el tamaño de la ventana debido a la presencia de píxeles sin valor.

Para la variable textural de la Homogeneidad, se observó visualmente que la componente del desplazamiento de la ventana cambia notablemente la apariencia de la imagen, mejorándola en aquellas zonas donde la orientación coincide con la de la muestra. Al aumentar el tamaño de la ventana (9×9) se produce un ligero efecto de suavizado pero cuando se disminuye la desviación general de los datos. Esto hace que esta variable textural tenga que ser tenida en cuenta porque dependiendo de la zona de la imagen muestreo y del desplazamiento de la ventana, puede aumentar la desviación

estándar viéndose muy afectada por el ruido inherente de la imagen. De igual modo se puede utilizar para disminuir la desviación en los polígonos de muestra.

Los resultados obtenidos con el Segundo Momento Angular son parecidos a los de la Homogeneidad pero necesita mayores tamaños de ventana para eliminar los píxeles sin valor. Además, y de modo contrario a lo que ocurre con la textura Homogeneidad, esta variable textural se ve más influenciada por los píxeles sin valor. Esto puede ser interesante porque se puede utilizar cada una de estas variables en función del efecto de suavizado y relleno de píxeles sin valor que queramos obtener dependiendo de las características de nuestra imagen de partida.

Al analizar los datos por variables texturales y clases se comprobó que este método podía servir para destacar errores de asignación de clases, y es destacable que influye más el contexto de los alrededores del polígono que los propios píxeles que abarca. Para la variable textural de la Media, se resalta la mayor separabilidad de las clases con respecto a las variables Homogeneidad y Segundo Momento Angular. Los términos extremos de sedimentos marinos aparecen con buena separabilidad mientras que las diferentes clases de arenas se solapan más. Hay que tener en cuenta que la mayoría de las muestras son términos heterogéneos que incluyen varias clases de tamaños de sedimentos, y por tanto, su respuesta de retrodispersión y textural va a estar condicionada por la proporción de cada uno de ellos. Además, hay que tener en cuenta que los límites entre clases no son netos y definidos ya que hay una constante transición espacial de los sedimentos que dificulta la identificación exacta de los límites de cada tipo de sedimentos marinos (Bureau Hidrográfico Internacional, 2005). Con estos valores se puede identificar con fiabilidad los tres términos generales de sedimentos (gravas-arenas-fangos) pero para diferenciar los términos intermedios (arenas finas-arenas medias-arenas gruesas) hay que contar con otro tipo de análisis y tratamientos.

De esta manera, se comprueba que el tamaño de ventana y el desplazamiento en muchas ocasiones es decisivo para el éxito de las clasificaciones. Fernández *et al.* (2003) es coin-

cidente en este aspecto, e indica que cuanto mayor es el tamaño de ventana, menos se distinguen los bordes de clase, que en este caso se traduce en una atenuación de las diferencias con las zonas sin valores de retrodispersión.

Conclusiones

El análisis textural aplicado a imágenes de retrodispersión obtenidas con sondas multihaz para el estudio de la plataforma continental genera nuevos niveles de información que ayudan en la interpretación y cartografía de las diferentes clases de fondos marinos. Pero hay otras muchas variables que influyen en la correcta interpretación de estos datos como son: la orientación en la toma de la retrodispersión; y los errores presentes en la toma de datos, tanto si son debidos al ruido del barco o a zonas sin datos, que podía hacer que dicha homogeneidad no fuera la característica de textura idónea.

Comprobamos que la respuesta acústica nos puede dar información sobre la distribución de los sedimentos marinos, pero es indispensable tomar datos adicionales, como fotografías del fondo, videos de transectos o los propios dragados, ya que si no es imposible explicar a que se deben las diferencias en los valores de retrodispersión. Esto se debe a que para las matrices de co-ocurrencia no hay ningún modelo que las vincule con las propiedades físicas a un fondo marino específico, de manera que dos fondos de litologías diferentes pueden exhibir las mismas características de textura.

Los patrones definidos por la retrodispersión de sonda multihaz han sido interpretados para determinar las clases de sedimentos establecidas (de acuerdo al tamaño de grano) presentes en el fondo marino. Los valores extremos permiten diferenciar los grandes grupos (valores altos corresponden a gravas, valores bajos a fangos y valores intermedios a arenas).

Los análisis de media e intervalo de datos permiten identificar en situaciones favorables fronteras entre tipos de sedimentos que no se aprecian en otros niveles de información. El bandeado sistemático del nivel de procesado de los datos de retrodispersión multihaz que hemos utilizado dificulta la identificación de las

diferentes clases granulométricas de arenas de fondo marino utilizando variables texturales. Para el caso de las clases de fangos y gravas este tipo de análisis es más eficaz y preciso.

El análisis textural (matriz de ocurrencia y matriz de co-ocurrencia) de estos valores aporta nuevos niveles de información que, junto a los sombreados y la batimetría, permiten identificar límites entre diferentes clases de sedimentos y su clasificación que únicamente con la imagen de retrodispersión no es posible, y por tanto, es una metodología que debe desarrollarse y ser tenida en cuenta para trabajos con objetivos similares.

Agradecimientos

Los datos utilizados para este trabajo pertenecen al proyecto ESPACE (Estudio de la plataforma continental española) de la Secretaría General del Mar perteneciente al Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.

Referencias

- ANYS, H., BANNARI, A., HE, D. C. & MORIN, D. 1994. Texture analysis for the mapping of urban areas using airborne MEIS-II images. *Proceedings of the First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, 3, 231-245.
- BLONDEL, P. & MURTON, J. 1997. Handbook of seafloor sonar imagery. *Publisher John Wiley & Sons, Chichester/Praxis Publishing*, Chichester, 1997, 314 pp.
- BUREAU HIDROGRÁFICO INTERNACIONAL. 2005. Clasificación del fondo marino y detección de accidentes. En: Organización Hidrográfica Internacional (eds.). *Manual de Hidrografía (Publicación M-13)*, 199-256. Mónaco.
- FERNÁNDEZ-SARRÍA, A., RECIO-RECIO, J. & RUIZ-FERNÁNDEZ, L. 2003. Análisis de imágenes mediante texturas: aplicación a la clasificación de unidades de vegetación. *GeoFocus*, 3, 143-159.
- FERRO, C. & WARNER, T. 2002. Scale and texture in digital image classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68, 51-63.
- FRANKLIN, S. E. 2001. Remote Sensing for Sustainable Forest Management. *Ed. Lewis Publishers*. pp 407.
- GOFF, J. A., OLSON, H. C. & DUNCAN, C. S. 2000. Correlation of side scan backscatter intensity with grain size distribution of shelf sediments. *New Jersey margin. Geo Mar. Lett.* 20, 43-49.
- HANQUIEZ, V., MULDER, T., LECROART, P., GONTHIER, E., MARCHÈS, E. & VOISSET, M. 2007. High resolution sea floor images in the Gulf of Cadiz, Iberian margin. *Marine Geology*, 246, 42-59.
- HARALICK, R. M., SHANMUGAN, K. & DINS-TEIN, I. 1973. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetic*. 3, 610-621.
- HERZFIELD, U. C. 1993. A method for seafloor classification using directional variograms, demonstrated for data from the western flank of the Mid-Atlantic Ridge. *Math. Geology*, 25, 901-924.
- HUGHES CLARKE, J. E., MAYER, L. A. & WELLS, D. E. 1996. Shallow-water imaging multibeam sonars: A new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf. *Marine Geophysical Researches*, 18, 607-629.
- JACKSON, D. R., WINEBRENNER, D. P. & ISHIMARU, A. 1986. Application of the composite roughness model to high-frequency bottom scattering. *J. Acoust. Soc. Am.*, 79, 1410-1422.
- LOBO, F. J., FERNÁNDEZ-SALAS, L. M., MORENO, I., SANZ, J. L. & MALDONADO, A. 2006. The sea-floor morphology of a Mediterranean shelf fed by small rivers, northern Alborán Sea margin. *Continental Shelf Research*, 26: 2607-2628.
- LYNN FERINI, V. & FLOOD, R. D. 2006. The effects of fine-scale surface roughness and grain size on 300 kHz multibeam backscatter intensity in sandy marine sedimentary environments. *Marine Geology*, 228, 153-172.
- LO IACONO, C., GRÀCIA, E., DIEZ, S., BOZZANO, G., MORENO, X., DAÑOBEITA, J. & ALONSO, B. 2008. Seafloor characterization and backscatter variability of the Almeria Margin (Alborán Sea, SW Mediterranean) based on high-resolution acoustic data. *Marine Geology*, 250, 1-18.
- MAILLARD, P. 2003. Comparing Texture Analysis Methods through Classification, *PE&Remote Sensing*, 69. pp. 357-367.
- MAS, J. 1996. Aspectos oceanográficos y biogeográficos de sureste peninsular. Algunas consideraciones ambientales. «Accesible en URL: [http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-RNMA-c1/\\$File/RNMA-c1.pdf](http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-RNMA-c1/$File/RNMA-c1.pdf)» Consultado el 27 de octubre de 2011.
- MATEU, G., REY, J. & DÍAZ DEL RÍO, V. 1984. Las barras submarinas de la zona interna de la plataforma continental frente al Mar Menor (Murcia, España): Estudio sísmico y cronobioestadístico. *Thalassas*, 22, 33-42.
- MEDIALDEA, T., SOMOZA, L., LEÓN, R., FARRÁN, M., ERCILLA, G., MAESTRO, A., CA-

- SAS, D., LLAVE, E., HERNÁNDEZ-MOLINA, F. J., FERNÁNDEZ-PULGA, M. C. & ALONSO, B. 2008. Multibeam backscatter as a tool for seafloor characterization and identification of oil spills in the Galicia Bank. *Marine Geology*, 249, 93-107.
- MITCHELL, N. C. & HUGHES CLARKE, J. E. 1994. Classification of seafloor geology using multibeam sonar data from the Scotian Shelf. *Marine Geology*, 121, 143-160.
- NITSCHKE, F. O., BELL, R., CARBOTTE, S. M., RYAN, W. B. F. & FLOOD, R. 2004. Process-related classification of acoustic data from the Hudson River Estuary. *Marine Geology*, 209, 131-145.
- PONCE, R. A. 2005. Métodos de Análisis y Procesamiento de Datos Batimétricos Monohaz y Multihaz, Presente y Futuro. *Convención Nacional de Geografía 2005*. Manzanillo, Colombia.
- PRESUTTI, M. E. 2004. La matriz de co-ocurrencia en la clasificación multispectral: tutorial para la enseñanza de medidas texturales en cursos de grado universitario. *4ª Jornada de educación em Sensoramento Remoto no Âmbito do Mercosul*. 2004. São Leopoldo, Brasil.
- PRESUTTI, M. E., FRANKLIN, S. E., MOSKAL, L. M. & DICKSON, E. E. 2001. Supervised classification of multisource satellite image spectral and texture data for agricultural crop mapping in Buenos Aires Province, Argentina. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27, 6, 679-684.
- REY, J. & DÍAZ DEL RÍO, V. 1983. La Plataforma Continental mediterránea entre Cabo de Palos y Cabo Tiñoso. Morfología y estudios sísmicos de la cobertura sedimentaria. *Información Técnica del Instituto Español de Oceanografía*, 11, 26 pp.
- RØNHØVDE, A. 1999. High Resolution of Beam forming of SIMRAD EM3000 Bathymetric Multibeam Sonar Data. *Cand Scient thesis* (University of Oslo).
- RUIZ FERNÁNDEZ, J. M. 2005. Impacto ambiental de las desaladoras sobre las comunidades bentónicas marinas. *I. T*, 72, 40-47.
- SANZ, J. L., 2009. La investigación de la plataforma continental española. El proyecto ESPACE. «Accesible en URL: http://www.ieo.es/ESPACE/descripcion_ESPACE.htm» Consultado el 24 de Agosto de 2009.
- URGELES, R., LOCAT, J., SCHMITT, T. & HUGHES CLARKE, J. E., 2002. The July 1996 flood deposit in the Sanguenay Fjord, Quebec, Canada: implications for sources of spatial and temporal backscatter variations. *Marine Geology*, 184, 41-60.