

Journal of Iberian Geology
2000, vol. 26, 45-66

ISSN: 0378-102X

*Aplicación del Sonar de Barrido Lateral
a la cartografía de fondos marinos. Ejemplo
de la Ría de Pontevedra (Galicia, NO España)*

*Side Scan Sonar application to seabed mapping
of the Ría de Pontevedra (Galicia, NW Spain).
A case of study.*

R. DURÁN, S. GARCÍA-GIL Y F. VILAS

Departamento de Geociencias Marinas y Ordenación del Territorio, Facultad de Ciencias,
Universidad de Vigo, 36200 Vigo (Pontevedra).

RESUMEN

Se realiza una cartografía de detalle de los fondos actuales de la Ría de Pontevedra basándose en los registros de sonar de barrido lateral. El análisis de los sonogramas obtenidos permite diferenciar cuatro patrones de reflectividad. Los datos de muestras directas del fondo obtenidas dentro de la zona que caracteriza a cada patrón establecen la relación directa entre reflectividad-textura. La correlación de las sonografías con la geología de la zona emergida hacen posible distinguir en los registros los dos tipos de basamento (granítico y metamórfico) en función de sus reflectividades y rasgos estructurales (fracturas). El sistema acústico aplicado permite discriminar entre formas sedimentarias (megaripples) y antrópicas (bateas, marcas de arrastre), a la vez que se establece su relación directa con las condiciones hidrodinámicas y rasgos morfológicos de la Ría de Pontevedra.

Palabras clave: Sonar de barrido lateral, cartografía de alta resolución, reflectividad, rías, Galicia.

ABSTRACT

Side scan sonar is used to provide a high resolution mapping of the seafloor of the Ría de Pontevedra. Sonograph analysis allows us to distinguish four backscatter patterns. Bottom samples within each pattern establish a direct relationship between backscatter and sediment texture. Sonograph correlation with land geology permit the differentiation between granitic and metamorphic basement, as well as its structural features (fractures). The side scan sonar is also used for discriminating sedimentary (megaripples) and anthropogenic features (mussel rafts, trawl-marks) and also for establishing the relationship between the hydrodynamic conditions and geomorphology of the Ría.

Keywords: Side scan sonar, high resolution mapping, backscatter, rías, Galicia.

INTRODUCCIÓN

En la Ría de Pontevedra, al igual que sucede en las demás Rías Baixas de Galicia, se desarrolla una economía regional basada en actividades relacionadas con el mar y el ámbito de la misma (pesca, cultivos marinos, turismo, distintas factorías industriales, etc.). Los problemas derivados de esas actividades tienen incidencia en el medio físico de su entorno ocasionando cambios notables en la distribución sedimentaria del fondo (Tecnología Ambiental, S.A., 1991), que a su vez afectan a los ambientes bentónicos (Pazó, 1987). Desde el punto de vista medioambiental, la Ría de Pontevedra sufre el impacto generado por los sectores productivos y los vertidos urbanos e industriales. Los trabajos realizados en esta Ría evidencian una alta concentración de contaminantes, muchos de ellos acumulados en los sedimentos de grano fino (Rubio *et al.*, 1995; 1996). Estas circunstancias hacen necesario tener un conocimiento preciso de los fondos sedimentarios, batimetría de detalle, patrones de transporte, etc., con el fin de identificar la importancia relativa de los procesos de transporte y removilización del sedimento que servirán como guía y base para posteriores estudios (seguimiento de contaminantes, diferenciación de ambientes bentónicos, etc.).

La aplicación de técnicas acústicas de alta resolución, tales como el sonar de barrido lateral, a la cartografía ha resultado muy útil en el estudio de ambientes sedimentarios (Knebel *et al.*, 1996; 1999; Schwab *et al.*, 1997), elaboración de mapas texturales del fondo (Barnhardt *et al.*, 1998), cartografía geológica (Schwab *et al.*, in press), análisis de formas sedimentarias (Belderson *et al.*, 1972; Leckie *et al.*, 1988; Schwab *et al.*, 1996) y estudio de formas de escape de gas (King y MacLean, 1970; Hovland y Judd, 1988; García-Gil *et al.*, 1999a; García-García *et al.*, 1999b).

Los trabajos realizados en las Rías Gallegas acerca de la distribución de sedimentos utilizando como técnica complementaria el sonar de barrido lateral son muy recientes y escasos. En la Ría de Pontevedra, Rey (1993) define un perfil

de sonar de barrido lateral dentro de un estudio de las Rías Baixas. No obstante, los estudios sedimentológicos en la zona en general, y de la Ría de Pontevedra en particular, son más numerosos.

Los primeros mapas detallados de la Ría de Pontevedra tratan de la distribución de los sedimentos superficiales, contenido en materia orgánica y carbonatos, basados en muestras superficiales de sedimento regularmente espaciadas (Vilas *et al.*, 1996). Recientemente, los estudios en la Ría se centran en el origen y relleno sedimentario de la Ría (García-Gil *et al.*, 1999b), a partir de la interpretación sísmica de alta resolución. El objetivo de este estudio es la cartografía de alta resolución de la Ría de Pontevedra mediante la aplicación de técnicas geofísicas, fundamentalmente sonar de barrido lateral. La cartografía de los cuatro patrones sonográficos identificados en la Ría y su correlación con muestras superficiales de sedimento permite: (1) caracterizar de forma precisa la extensión y naturaleza de los afloramientos rocosos, (2) la distribución de los dominios texturales de los sedimentos, (3) caracterizar las formas sedimentarias del fondo e (4) identificar marcas antropogénicas. La correlación de las sonografías con la batimetría, medidas de corrientes de fondo e información geológica de la parte emergida permite realizar la interpretación geológica del fondo actual y estudiar los procesos oceanográficos que determinan la variabilidad espacial de los sedimentos superficiales del fondo.

SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y BATIMETRÍA

La Ría de Pontevedra ocupa una superficie de 145 km², siendo la tercera en tamaño de las Rías Bajas, después de Vigo y Arousa (Fig. 1). Sus coordenadas son: 42° 18'N - 42° 25'N y 8° 58'O - 8° 40'O, y se caracteriza por presentar en planta una morfología de embudo, con una orientación de su eje mayor SO-NE, excepto en la Ensenada de Aldán, cuya orientación es N-S.

La batimetría actual dibuja una morfología en forma de artesa, que presenta un canal central con una sección transversal en forma de V, semejante a la de un valle fluvial. Al norte de las Islas, situadas en su entrada, entre Ons y Pta. Fagilda, la topografía se caracteriza por la presencia de afloramientos rocosos someros (profundidades menores de 15 m) con dos canales más profundos. En la entrada Sur se alcanzan las mayores profundidades (hasta 65 m) sin presencia de afloramientos rocosos importantes.

Aunque el eje principal de la Ría tiene una dirección NE-SO, el canal delimitado por la batimetría muestra tres direcciones diferentes a lo largo del mismo. En la parte más interna y somera de la Ría, el canal está más próximo a la costa Norte, con dirección NE-SO. Al llegar a las ensenadas de Bueu y Sanxenxo, la pendiente se suaviza y la orientación es casi E-O hasta Cabo Udra, punto a partir del cual el canal central vuelve a tomar la dirección NE-SO y a aumentar la profundidad progresivamente hacia la entrada.

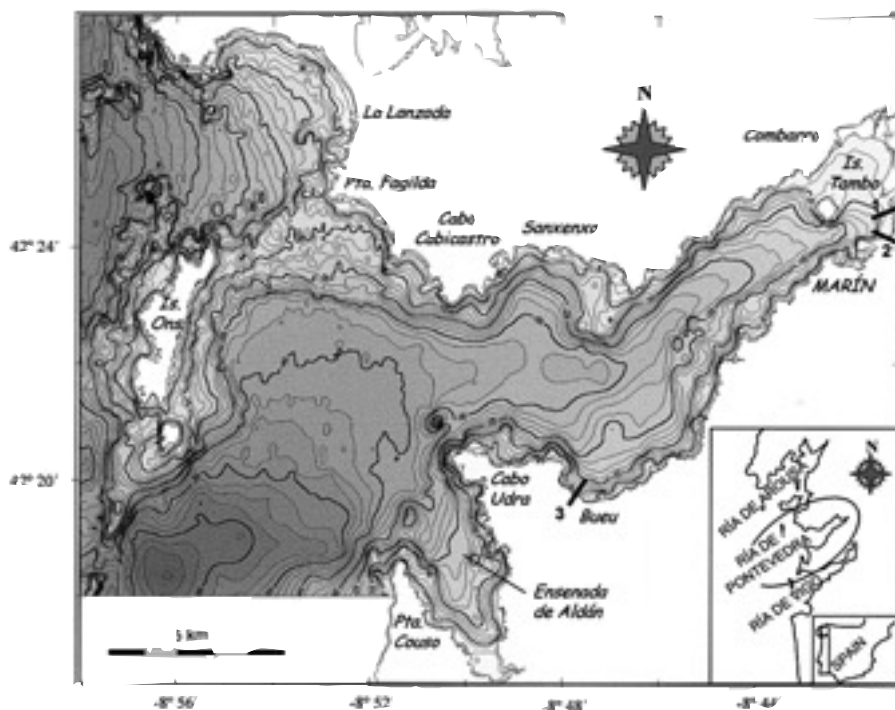


FIG. 1.—Localización geográfica de la Ría de Pontevedra y mapa batimétrico (curvas en metros), mostrando la situación de: (1) y (3) vertidos industriales, y (2) colector de aguas residuales.

FIG. 1.—Geographical setting of the Ría de Pontevedra and bathymetry mapping (contours in metres) showing the location of: industrial waste (1&3) and (2) waste pipe.

MARCO GEOLÓGICO Y DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS

La costa de Galicia forma parte del dominio hercínico ibérico, que comprende antiguas rocas metamórficas y graníticas (Abril Gómez *et al.*, 1981; Abril Hurtado *et al.*, 1981; Rubio *et al.*, 1981) que presentan una estructura fallada de edad también hercínica, parcialmente modificada por los movimientos alpinos y profundamente excavada por la erosión fluvial (Fig.2). La tectónica posthercínica origina importantes sistemas de fracturaciones con dirección SO-NE, N-E y ONO-ESE, algunas de las cuales se activaron durante el Mioceno-Plioceno, dando lugar a basculamientos de bloques a ambos lados de la zona fallada (García-Gil *et al.*, 1999b).

En la Ría de Pontevedra, al igual que en el resto de las Rías Baixas, se puede observar que las rocas ígneas posthercínicas y metamórficas del paleozoico aparecen dispuestas en bandas con direcciones N-S y NNO-SSE.

La distribución textural de sedimentos de la Ría de Pontevedra presenta una clara relación con la orientación de la ría frente a los vientos dominantes y la ba-

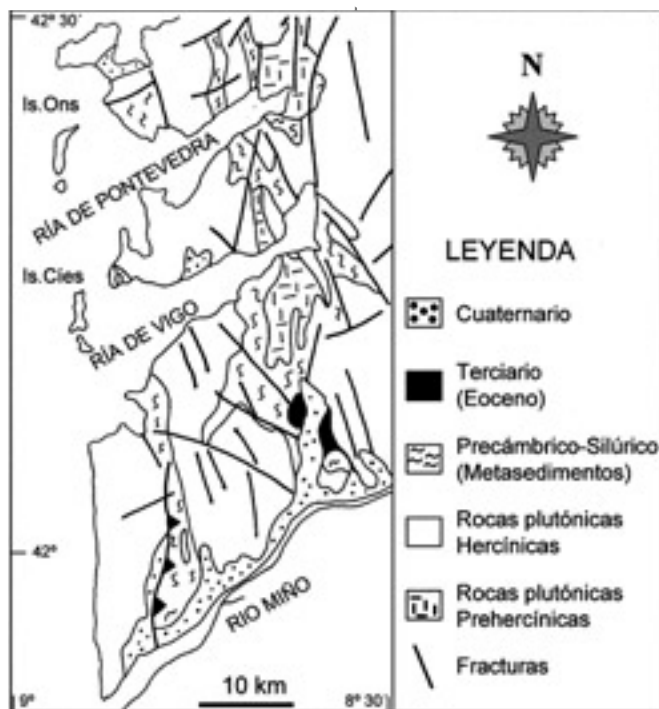


FIG. 2.—Situación geológica de la Ría de Pontevedra en el contexto de las Rías Baixas. Modificado de Abril Gómez *et al.*, 1981; Rubio *et al.*, 1981; Abril Hurtado *et al.*, 1981 y 1995.

FIG. 2.—Geological setting of the Ría de Pontevedra within the Rías Baixas context. Modified from Abril Gómez *et al.*, 1981; Rubio *et al.*, 1981; Abril Hurtado *et al.*, 1981 & 1995.

timetría (Vilas *et al.*, 1996). Las fracciones de grano fino se encuentran en las partes internas de la Ría (sector Norte y Oeste de la isla de Tambo) y las zonas de su eje. El material arenoso se distribuye en las zonas medias y externas, con tendencia a ocupar los márgenes meridionales y las partes más costeras de la ensenada de Aldán. Próximos a la costa, los campos de arena con predominio de gravas, se distribuyen formando orlas paralelas a la línea de costa.

HIDRODINÁMICA

La circulación en la Ría de Pontevedra presenta un patrón antihorario predominante. Aunque existe relación directa entre las corrientes de fondo y el estado de marea, se observa un flujo neto de salida por la costa Norte y una entrada de agua marina siguiendo la costa Sur (Fig. 3). Es importante resaltar la presencia de giros de corrientes en las ensenadas de Bueu y Sanxenxo (Ruiz Mateo, 1980). En la parte interna de la Ría, se aprecia una tendencia general del

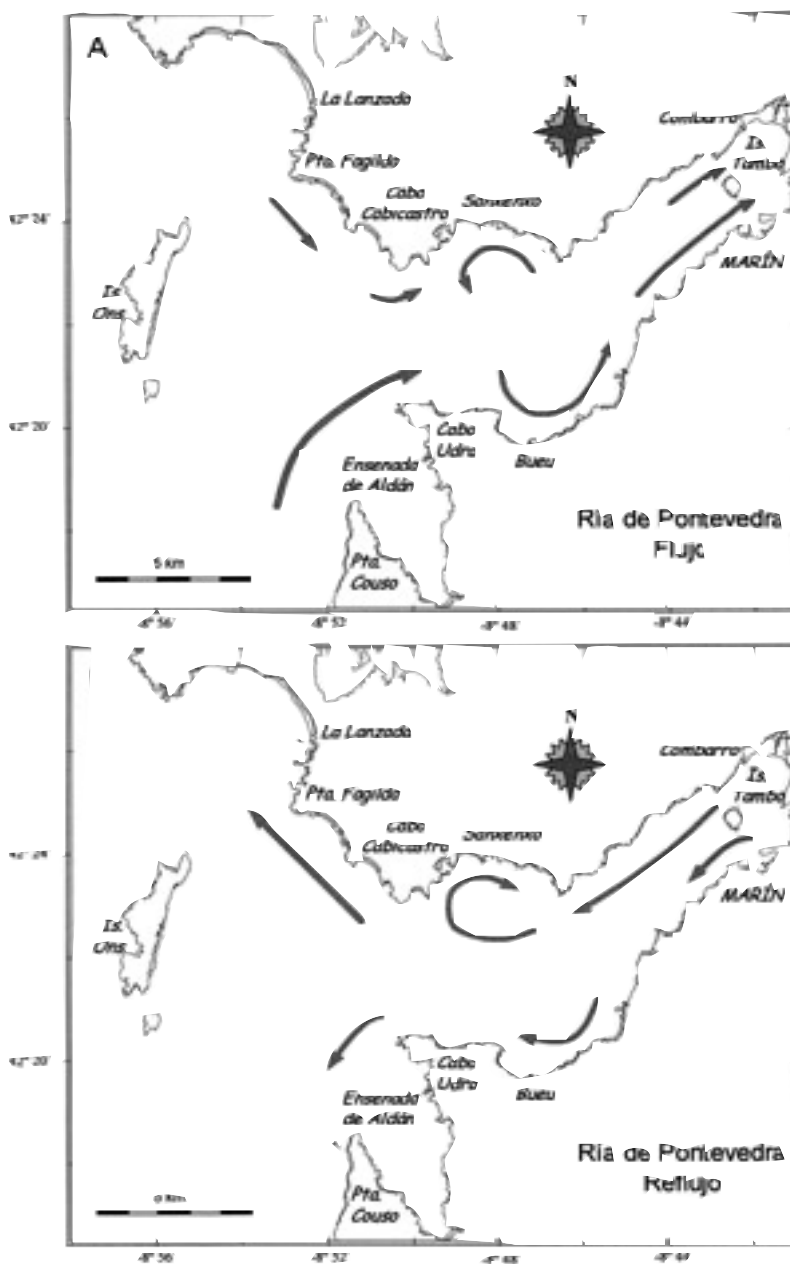


FIG. 3.—Principales direcciones de corrientes de marea en la Ría de Pontevedra. (A) Condiciones de flujo. (B) Condiciones de reflujo.

FIG. 3.—Main tidal directions in the Ría de Pontevedra. (A) Flood conditions. (B) Ebb conditions.

agua del río Lérez a aproximarse a la costa Norte por efecto de Coriolis, aunque en la zona de la Isla de Tambo, por efecto de la topografía, se canaliza por el SE de la Isla.

En general, las velocidades de corriente de fondo en el interior de la Ría son débiles, no superando los 14 cm/s (Gómez Gallego *et al.*, 1979; Ruiz Mateo *et al.*, 1980), aunque en la entrada Norte pueden alcanzar los 44 cm/s.

Las condiciones meteorológicas juegan un papel importante en la formación de olas y corrientes que controlan los procesos de sedimentación en la Ría (Vilas *et al.*, 1996). El sistema de circulación de la Ría puede verse afectado por tormentas, que inducen corrientes fuertes de oleaje, del SO durante el invierno y del NO durante el verano, que pueden edificar importantes cuerpos sedimentarios (García-Gil *et al.*, 1999b).

METODOLOGÍA

Se realizaron 340 km. de perfiles geofísicos, que incluyen sismica de alta resolución y sonar de barrido lateral, dentro de la Ría de Pontevedra durante el mes de Julio de 1996 (Fig. 4). El sistema de sonar de barrido lateral empleado para la obtención de los registros fue el Klein 595, operando a dos frecuencias

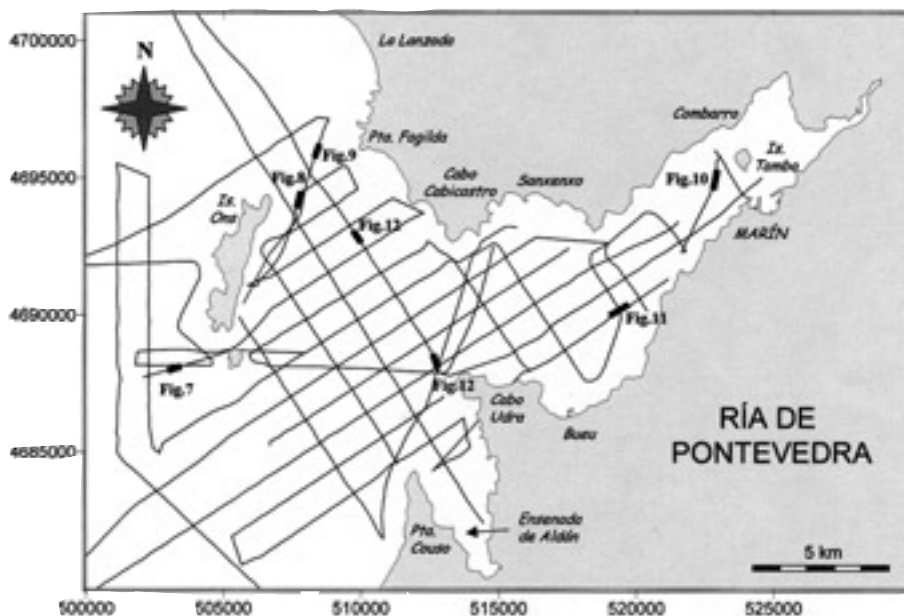


FIG. 4.—Localización de los registros de sonar de barrido lateral en la Ría de Pontevedra.

FIG. 4.—Side scan sonar survey in the Ría de Pontevedra.

simultáneamente, 100 y 500 kHz, con un rango de 200 m. La posición del pez fue calculada asumiendo que éste navegaba directamente bajo el barco, asunción aceptable cuando se navega en línea recta con poca cantidad de cable de arrastre. Los datos de sísmica fueron obtenidos con un EG&G Geopulse (300 J). Se programó una malla de perfiles con un espaciado de líneas de 1 km × 1 km para realizar una cartografía de detalle. El sistema de posicionamiento utilizado en la campaña fue un GPS diferencial de Trimble Navigator.

Aunque la distorsión longitudinal, producida por la variación en la velocidad del barco, es corregida automáticamente por el equipo, no se consigue un registro totalmente isométrico. Para la correcta localización y orientación geográfica de las fracturas y formas sedimentarias se realizó un procesado posterior de la imagen. Durante la campaña se obtuvieron dos registros de sonar simultáneamente, a uno de ellos (100 kHz) se le aplicó la corrección del rango, y es utilizado en estudios de detalle. A las sonografías empleadas en la elaboración del mapa (500 kHz) no se les aplicó la corrección del rango.

Para la elaboración del mapa batimétrico se utilizaron datos de ecosonda procedentes de la campaña «Estudio Geofísico marino entre las Islas Cíes y el

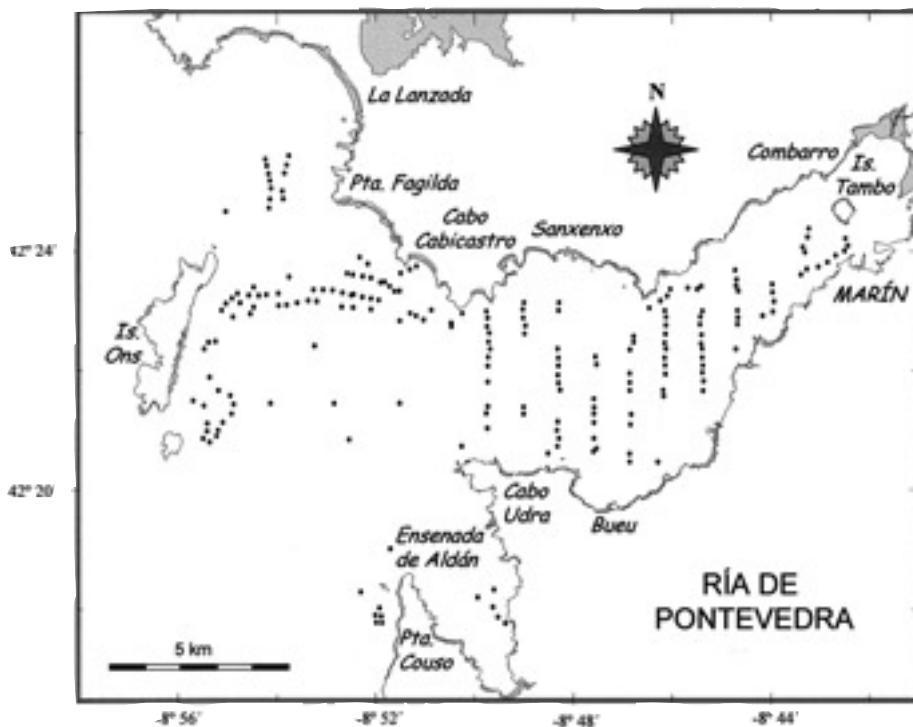


FIG. 5.—Mapa de localización de las muestras de fondo utilizadas en este trabajo.

FIG. 5.—Map of the seabed samples used in this paper.

límite de la provincia de la Coruña (Pontevedra), realizada por el MOPT en 1991, en la que se empleó una ecosonda electrónica Atlas modelo Deso-20. Para realizar las correcciones locales se midió la temperatura superficial en varios puntos, adoptando finalmente un promedio de 15° y la salinidad se tomó de la medida de los registros obtenidos en estudios anteriores en la zona (30 partes por mil). Una vez determinados estos valores se establece una velocidad media de transmisión de sonido en el agua de 1510 a 1530 m/s, con la que se ajusta la ecosonda. Las correcciones de marea se realizaron a partir del registro del mareógrafo autónomo de presión, de alta resolución, fondeado en el Puerto de Marín. Como complemento al sistema se incorporó un filtro compensador de oleaje TSS, con el que se consiguió reducir el efecto del oleaje, y por tanto obtener una mejor resolución de los datos.

La base de datos obtenida se grabó en una cinta magnética, a través del digitalizador de la ecosonda Atlas Deso-20, programando el tiempo de grabación en un registro cada 25 metros. Los datos se integraron con los del sistema de posicionamiento, obteniéndose una malla de 50 × 150 m. En las zonas demasiado someras para el calado del barco, se completaron los datos de profundidad con las sondas de la carta náutica 1:5000 de la Ría de Pontevedra. El mapa de contornos se realizó mediante el programa Surfer 32, utilizando el kriging como método de interpolación.

Se correlacionan las facies acústicas identificadas en las imágenes de sonar con las texturas de fondo, a partir de las muestras superficiales de sedimento (Fig. 5), obtenidas con una draga Van-Veen, en la campaña realizada por el MOPT en 1991.

PATRONES SONOGRÁFICOS IDENTIFICADOS

Se definen cuatro patrones sonográficos en la Ría de Pontevedra a partir de los registros de sonar de barrido lateral, correlacionados con registros sísmicos de alta resolución (Geopulse) y muestras superficiales de sedimento.

La distribución granulométrica de las muestras de sedimento muestra una buena correlación con la intensidad relativa de reflectividad que aparece en la imagen de sonar (Fig. 6). La composición mineralógica de las muestras de los diferentes patrones sonográficos es muy similar. En general, la fracción fangosa de las muestras está compuesta por minerales arcillosos tales como caolinita, esmectita e illita, que tienen un origen diverso, tanto de aportes fluviales como marinos (Vilas *et al.*, 1996). Las fracciones más gruesas del sedimento se componen fundamentalmente de bioclastos (gasterópodos, bivalvos, foraminíferos y espículas y placas de equinodermos) y cuarzo. Minoritariamente aparecen fragmentos de roca (ígneas y/o metamórficas), micas y minerales pesados.

Las facies acústicas definidas en función de la intensidad de reflectividad mostrada en la imagen del sonar y los parámetros texturales de los sedimentos son: (1) reflectividad alta e irregular producida por afloramientos rocosos; (2)

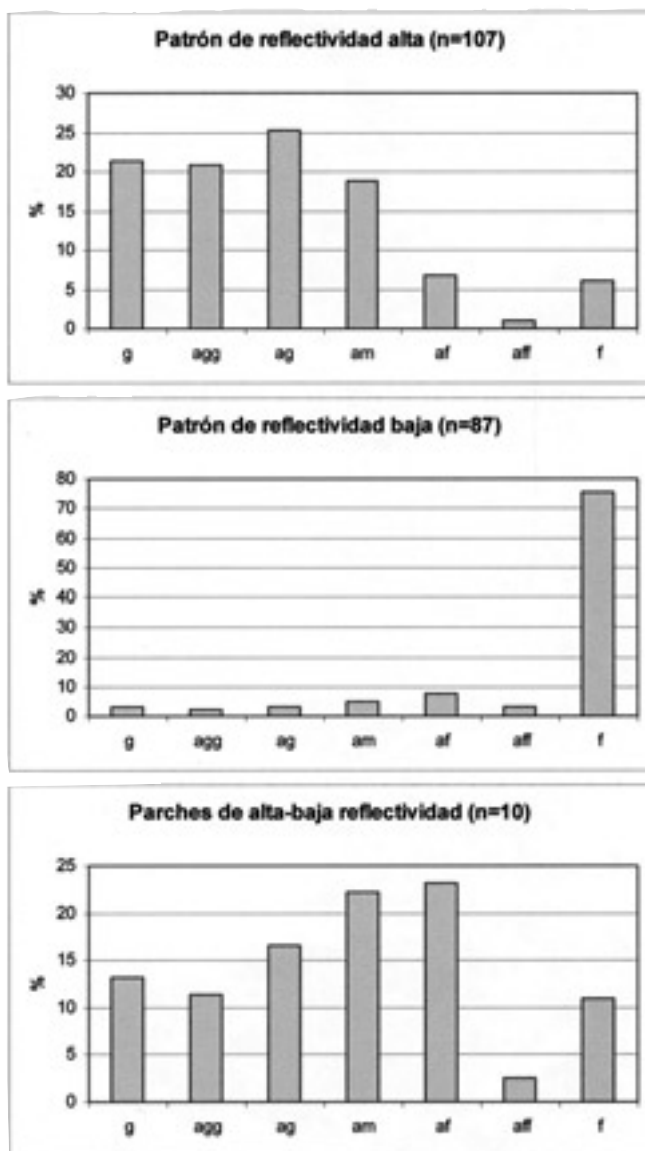


FIG. 6.—Diagramas que representan los porcentajes de las diferentes texturas presentes en las muestras (n = n.º muestras) para cada tipo de reflectividad. g: gravas (> 2mm), agg: arena muy gruesa (2-1mm.), ag: arena gruesa (1-0.5mm.), am: arena media (0.5-0.25mm.), af: arena fina (0.25-0.12mm.), aff: arena muy fina (0.12-0.062mm.), f: fango (<0.062mm.).

FIG. 6.—Diagrams representing the percentages of the different textures occurring in the samples (n = number of samples) of the backscatter patterns. g: gravel (> 2mm), agg: very coarse sand (2-1mm.), ag: coarse sand (1-0.5mm.), am: medium sand (0.5-0.25mm.), af: fine sand (0.25-0.12mm.), aff: very fine sand (0.12-0.062mm.), f: mud (<0.062mm.).

reflectividad alta, correspondiente a fondos de granulometrías gruesas; (3) reflectividad baja correspondiente a fondos de sedimentos finos; y (4) parches de alta y baja reflectividad en el sonograma como resultado de cambios texturales en los sedimentos superficiales (García-Gil *et al.*, 2000).

PATRÓN DE REFLECTIVIDAD ALTA E IRREGULAR

El patrón de reflectividad alta e irregular muestra un relieve importante y fracturas que dan lugar a sombras en el registro (P-1). En la Ría de Pontevedra se diferencian varios subtipos:

(a) Patrón de reflectividad alta e irregular con relieve poco importante y extensión limitada (P-1a), interpretado como afloramientos dispersos del basamento con poco relieve (Fig. 7).

(b) Patrón de reflectividad alta e irregular con relieve importante y fracturas (P-1b). Los registros de sismica obtenidos simultáneamente con las imágenes del sonar permiten identificar este patrón como afloramientos del basamento fracturados (Fig. 7). Se localiza alrededor de las islas de Ons y Onza, en la entrada Norte de la Ría y rodeando salientes costeros (Pta. Couso, Pta. Fagilda y Cabo Cabicastro).

(c) Patrón de reflectividad alta e irregular con claras direcciones estructurales y relieve apreciable, aunque menos acusado que en el caso anterior (P-1c). Se localiza en una banda N-S en la entrada Norte de la Ría entre zonas graníticas. A partir de los registros sísmicos se interpreta este patrón sonográfico como afloramiento del basamento (Fig. 8).

Las fracturas que afectan a los afloramientos rocosos tienen orientaciones preferentes NE-SO, NNO-SSE y N-S.

PATRÓN DE REFLECTIVIDAD ALTA Y UNIFORME

El patrón de reflectividad alta y uniforme da lugar a un oscurecimiento del registro (P-2). Las muestras de sedimento superficial situadas en las zonas de alta reflectividad (Fig. 6) se componen fundamentalmente de arenas gruesas (44%) y gravas (20%). Este patrón se encuentra generalmente asociado a afloramientos rocosos y en las proximidades de la costa. Localmente en este tipo de fondos de sedimentos gruesos se localizan campos de megaripples (Fig. 9) de longitud de onda variable (0.91-7.73 m).

PATRÓN DE REFLECTIVIDAD BAJA

El patrón con mayor extensión en la Ría de Pontevedra corresponde al de reflectividad media-baja (gris claro o blanco en el sonograma), sin irregularidades

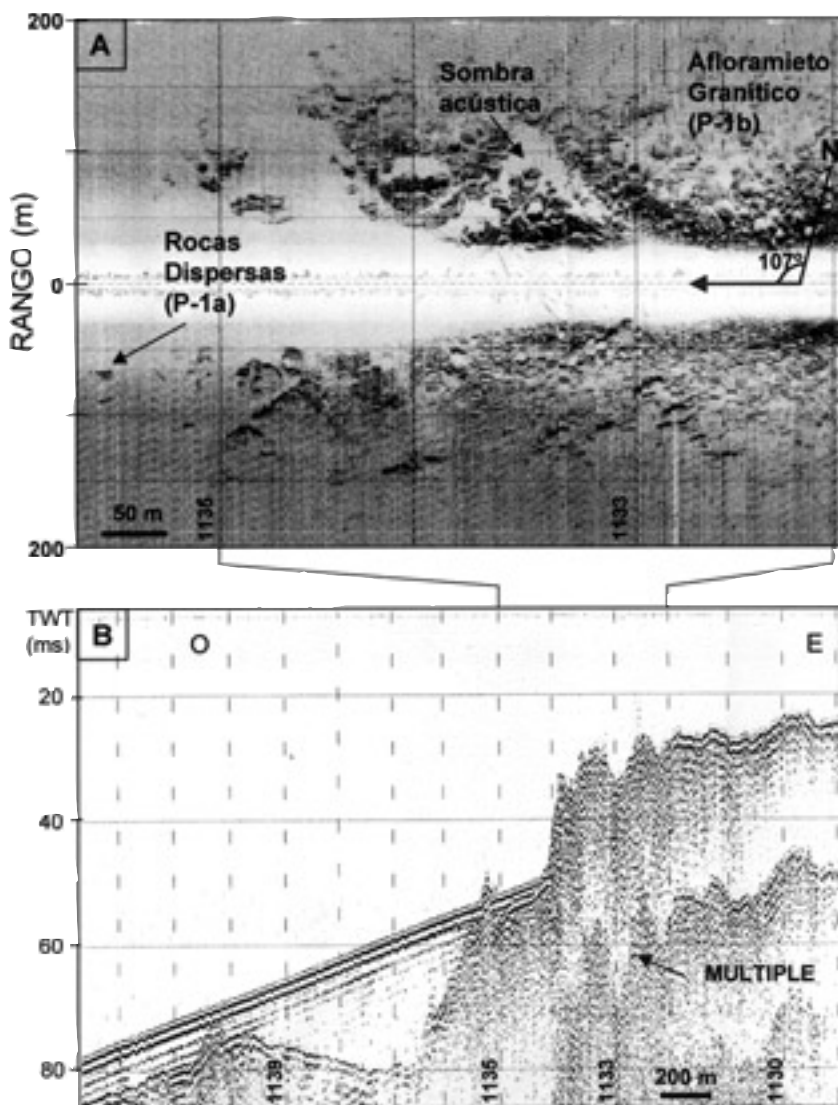


FIG. 7A.—Imagen de sonar de barrido lateral mostrando los patrones de reflectividad alta e irregular (P-1a y P-1b). 7B: Perfil sísmico de reflexión de alta resolución mostrando el aspecto típico de un afloramiento granítico del basamento. La escala vertical está en tiempo doble (TWT), en milisegundos. Los números de la parte inferior de ambos registros indican las marcas de control. Véase FIG. 4 para localización.

FIG. 7A.—Sonograph showing the high and irregular backscatter patterns (P-1a & P-1b). 7B: High resolution seismic reflection profile showing the typical seismic facies of the granite basement. Vertical scale is in two-ways time (TWT) in milliseconds. Numbers at the lower part in both figures indicate the fixes. See FIG. 4 for location.

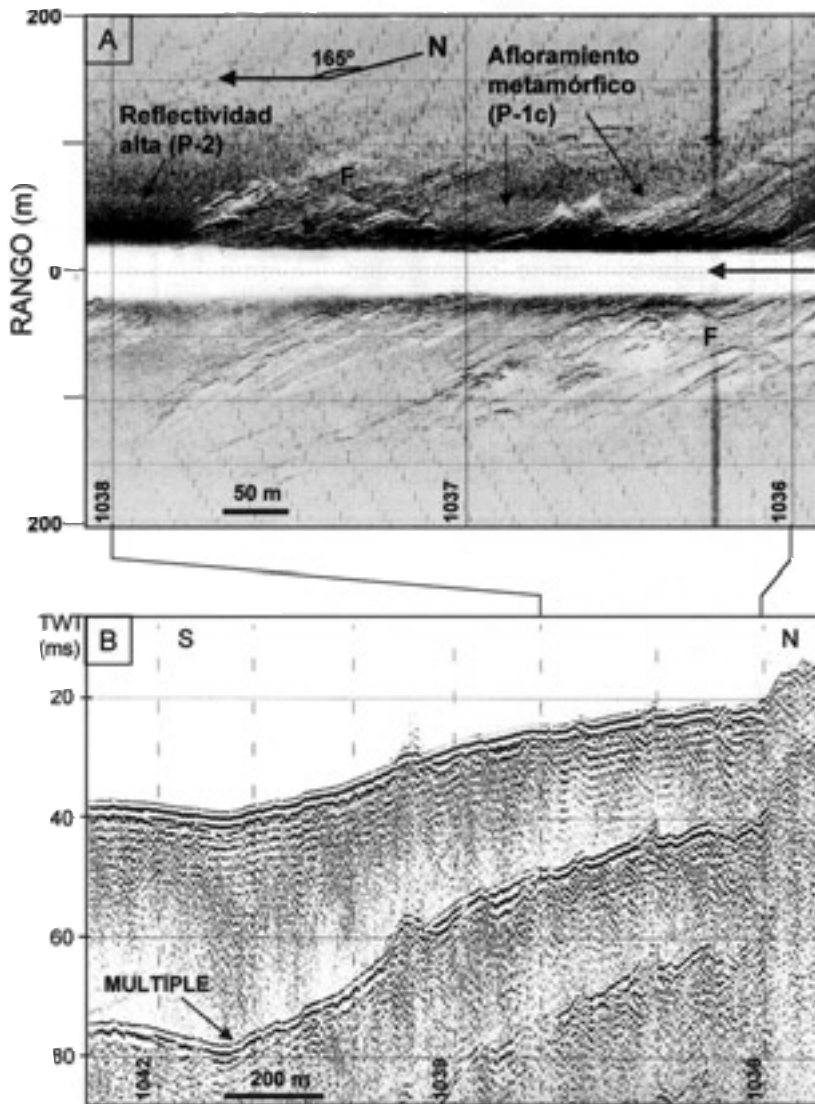


FIG. 8A.—Imagen de sonar de barrido lateral mostrando el patrón de reflectividad alta e irregular con claras direcciones estructurales (P-1c). 8B: Perfil sísmico de reflexión de alta resolución mostrando el aspecto típico de un afloramiento metamórfico del basamento. La escala vertical está en tiempo doble (TWT), en milisegundos. Los números de la parte inferior de ambos registros indican las marcas de control. Véase Fig. 4 para localización.

FIG. 8A.—Sonograph showing the pattern of high reflectivity with structural lineations (P-1c). 8B: High resolution seismic reflection profile showing the typical seismic facies of the metamorphic basement. Vertical scale is in two-ways time (TWT) in milliseconds. Number at the lower part in both figures indicate the fixes. See Fig. 4 for location.

morfológicas apreciables (Fig. 10) y de aspecto homogéneo (P-3). Las muestras de sedimento (Fig. 6) localizadas sobre este patrón se componen de arena fina-fango (11.5% y 69% respectivamente). Este patrón ocupa preferentemente las partes internas y central de la Ría, donde las velocidades de corrientes de fondo son débiles (menores de 14 cm/s).

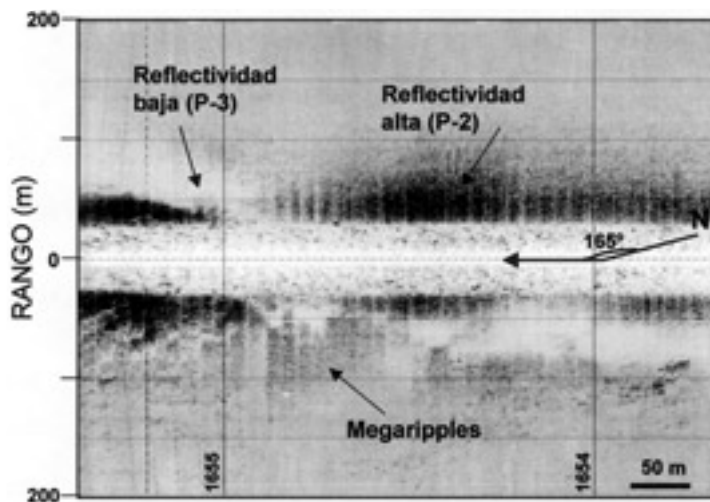


FIG. 9.—Imagen de sonar de barrido lateral mostrando los patrones de reflectividad alta (P-2) y baja (P-3). Se observa localmente la presencia de megaripples dentro del P-2. Los números de la parte inferior del registro indican las marcas de control. Véase FIG. 4 para localización.

FIG. 9.—Sonograph showing the high (P-2) and weak backscatter patterns (P-3). It is characteristic the local presence of bedforms as megaripples associated to the pattern (P-2). Numbers at the lower part in the figure indicate the fixes. See FIG. 4 for location.

La imagen de sonar correspondiente a este patrón revela la presencia de una serie de zonas más o menos circulares de reflectividad alta, sin relieve apreciable (Fig. 10A), que se interpretan como pockmarks (García-Gil, *et al.*, 2000), similares a los encontrados en la Ría de Vigo (García-García *et al.*, 1999; García-Gil *et al.*, 1999a). Los registros de sísmica de reflexión de alta resolución coincidentes con estas zonas denotan además, la presencia de acumulaciones de gas en los sedimentos infrayacentes (Fig. 10B). Estas formas de fondo producidas por escapes de gas se registran en las imágenes de sonar como manchas oscuras (alta reflectividad) y geometría circular u ovalada, denominadas por Hovland (1989) como «eyed-pockmarks».

El impacto provocado por la actividad humana se hace más evidente en las zonas internas de la Ría. La presencia de acumulaciones de sedimentos originadas por cultivos de especies marinas se hace evidente en zonas donde se ubican las instalaciones flotantes de polígonos de bateas (grupos de plataformas) actuales. Se registran en el sonograma como formas rectangulares de muy alta

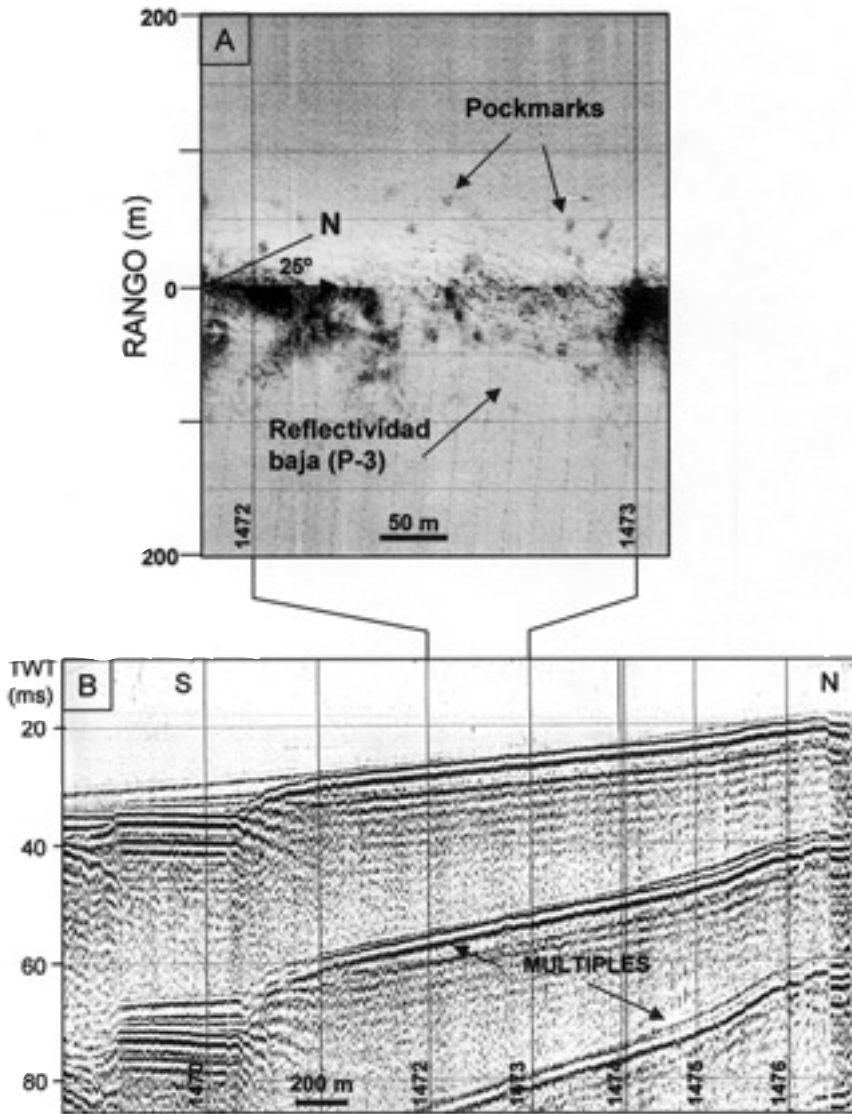


FIG. 10A.—Imagen de sonar de barrido lateral mostrando el patrón de reflectividad baja (P-3) y pockmarks. 10B: Perfil sísmico de reflexión de alta resolución mostrando apantallamientos acústicos debidos a la presencia de gas en los sedimentos infrayacentes. La escala vertical está en tiempo doble (TWT), en milisegundos. Los números de la parte inferior de ambos registros indican las marcas de control. Véase FIG. 4 para localización.

FIG. 10A.—Sonograph showing weak backscatter (P-3) and pockmarks. 10B: High resolution seismic reflection profile showing acoustic blanking due to the occurrence of gas in the underlying sediments. Vertical scale is in two-ways time (TWT) in milliseconds. Numbers at the lower part in both figures indicate the fixes. See FIG. 4 for location.

reflectividad (negro), que corresponde al amarre de la batea (Fig. 11). En ocasiones es posible registrar también el cable que une la estructura flotante al amarre o incluso las propias cuerdas a las que se fijan los mejillones, cuando el transductor del sonar pasa muy próximo a las bateas. El oscurecimiento del registro alrededor del punto de anclaje se atribuye a los residuos procedentes de los moluscos (fecales, animales desprendidos de las cuerdas, y fragmentos que se desprenden en las operaciones de limpieza de las bateas). También se localizan marcas de arrastre por diferentes artefactos próximos a la costa e igualmente en zonas de bateas. Es importante considerar la localización de estas marcas con respecto a la presencia de gas somero, ya que pueden actuar como mecanismo de activación de escapes de gas (García-García *et al.*, 1999). Del mismo modo, la removilización de sedimento por actividades de arrastre puede afectar a la dispersión de contaminantes presentes en la zona interna de la Ría.

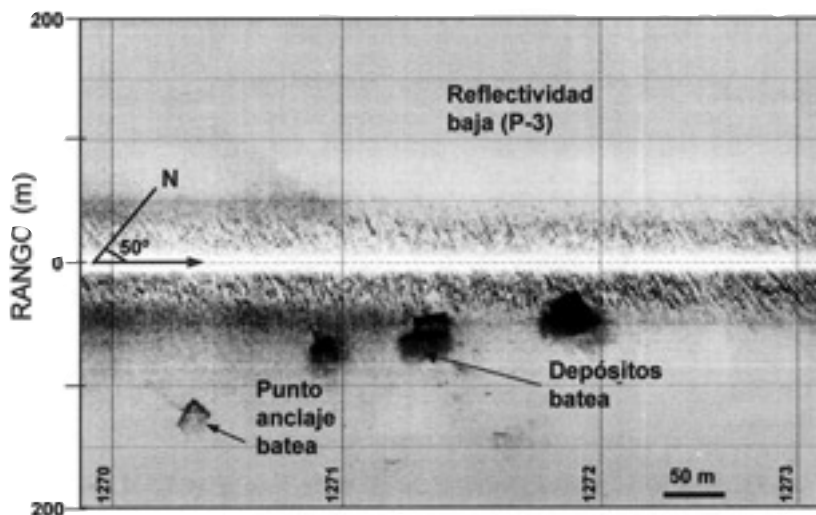


FIG. 11.—Imagen de sonar de barrido lateral mostrando el patrón de reflectividad baja (P-3) y depósitos de bateas (plataformas flotantes de cultivos marinos). Los números de la parte inferior del registro indican las marcas de control. Véase FIG. 4 para localización.

FIG. 11.—Sonograph showing weak backscatter (P-3) and mussel raft deposits. Number at the lower part in the figure indicates the fixes. See FIG. 4 for location.

PATRÓN CON PARCHES DE ALTA Y BAJA REFLECTIVIDAD

Este patrón se caracteriza por la alternancia de zonas de alta y baja reflectividad en escalas espaciales pequeñas y sin relieve aparente (P-4). Se distinguen dos tipos de parches: irregulares y longitudinales (Fig. 12), localizados preferentemente en las áreas de contacto entre sedimentos gruesos y finos (Rao,

1989) y donde las corrientes de fondo son más importantes. Las muestras superficiales localizadas sobre este patrón denotan una gran heterogeneidad en el tamaño de grano, resultando curvas granulométricas muy leptokúrticas y con mala selección (Fig. 6).

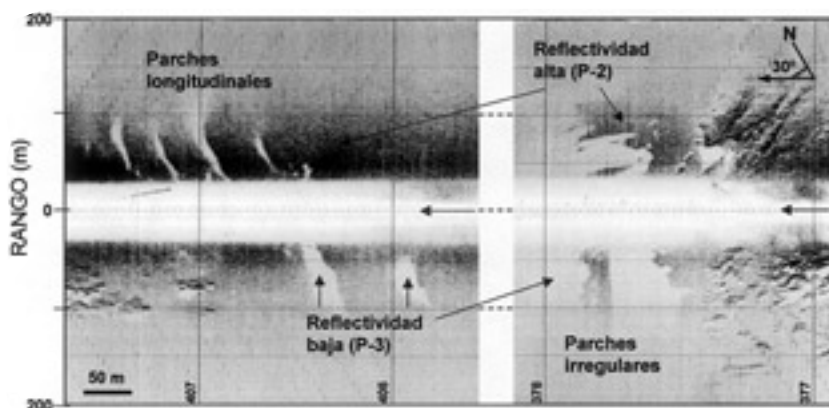


FIG. 12.—Imagen de sonar de barrido lateral mostrando los parches de reflectividad alta (P-2) y baja (P-3). Los números de la parte inferior del registro las marcas de control. Véase FIG. 4 para localización. FIG. 12.—Sonograph showing patches of strong (P-2) and weak (P-3) backscatter. Numbers at the lower part in the figure indicate the fixes. See FIG. 4 for location.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

La correlación de las imágenes de sonar de barrido lateral con los registros sísmicos y los datos de geología de superficie, ha permitido determinar con precisión la extensión y naturaleza de los afloramientos rocosos (Fig. 13). Se interpretan como afloramientos de rocas graníticas, los representados en la imagen del sonar por patrones de reflectividad alta e irregular con relieve apreciable (P 1a y 1b), ya que aparecen en continuidad espacial con las bandas de granitos de la cartografía de tierra. Por otro lado se identifican como afloramientos de rocas metamórficas las zonas de reflectividad alta e irregular con claras direcciones estructurales en el sonograma (P-1c). Estas últimas se localizan en la entrada Norte de la Ría según una banda N-S, que también está en continuidad espacial con los correspondientes materiales metamórficos de la zona emergida. Las fracturas que afectan a estos afloramientos rocosos muestran orientaciones coincidentes con las fallas cartografiadas en el mapa geológico (NE—SO, NNO-SSE y N-S).

El patrón de baja reflectividad (P-3, arena fina-fango) ocupa la mayor extensión del lecho de la Ría, se localiza en las zonas más profundas y donde las corrientes de fondo son débiles (Fig. 13). Esto nos lleva a interpretar dicho pa-

trón como característico de áreas dentro de la Ría donde las condiciones hidrodinámicas son de baja energía, permitiendo por lo tanto la sedimentación de estos materiales finos.

La distribución espacial del patrón de alta reflectividad (P-2, arena gruesa y grava) muestra una clara relación con la topografía y las condiciones oceanográficas. Se localiza en áreas someras, próximo a los afloramientos rocosos y/o zonas costeras, donde las corrientes de fondo son mayores. Son áreas sometidas a una intensa acción del oleaje, sobre todo en momentos de temporal. Todo ello denota un subambiente de sedimentación bajo condiciones de alta energía, donde sólo las granulometrías gruesas sedimentan e incluso generan megaripples, mientras que las finas son transportadas y sedimentadas en áreas de niveles energéticos bajos.

El transporte de sedimentos por carga de fondo en esta zona de alta reflectividad (P-2) se registra en el sonograma por la presencia de megaripples, con longitudes de onda variables (0.91-7.73) y crestas bifurcadas rectas o poco sinuosas. A partir de las dimensiones, tamaño de grano (arena gruesa y gravas) y morfología de estos megaripples, junto con los datos de corrientes se interpretan como generados por la acción del oleaje. Los megaripples de mayor longitud de onda se encuentran en la entrada Norte de la Ría, asociados a afloramientos rocosos, donde estas corrientes se intensifican por efecto de la morfología del fondo.

Localmente, aparecen en el sonograma parches longitudinales (P-4) debidos a la alternancia de alta (arena gruesa-gravas) y baja reflectividad (arena fina-fango). Se localizan preferentemente en la entrada Norte de la Ría, donde las corrientes de fondo alcanzan valores de hasta 44 cm/s. Estudios llevados a cabo por otros autores en áreas costeras y estuarios (Belderson *et al.*, 1972; Knebel *et al.*, 1991, 1996; Rao, 1989; Okyar y Ediger, 1997) relacionan estos parches con cambios en la textura del sedimento, generados por corrientes de fondo elevadas (Kuijpers *et al.*, 1993; Héquette *et al.*, 1995), que sufren una alta variabilidad espacial y temporal en su intensidad, hecho que provoca que los sedimentos sean erosionados y/o sedimentados de forma intermitente. Los parches de alta reflectividad representan formas de fondo producidas por la exposición de sedimentos de grano grueso o lavado de sedimentos finos, mientras que los parches de baja reflectividad se interpretan como acumulación de sedimentos finos sobre o rodeando sedimentos más gruesos (Knebel *et al.*, 1991).

Estudios oceanográficos llevados a cabo en la Ría de Pontevedra muestran la existencia de variaciones espaciales y temporales en la intensidad de las corrientes de fondo, diferencias que pueden acentuarse en zonas próximas a los afloramientos rocosos por efecto de la topografía. La coincidencia entre la orientación de los parches y su localización, en la zona Norte de la Ría, permite relacionar el origen de los mismos en la Ría con las variaciones espaciales en la intensidad de las corrientes, que a su vez están controladas por la topografía del basamento que aflora en el fondo actual de esta zona, donde los niveles energéticos son altos.



FIG. 13.—Cartografía de alta resolución del fondo de la Ría de Pontevedra elaborada a partir de los registros de sonar de barrido lateral, muestras de fondo y geología de superficie (Modificado de García-Gil *et al.*, 2000).

FIG. 13.—High resolution seafloor mapping of the Ría de Pontevedra based on side scan sonar records, seabed sampling and land geology (Modified from García-Gil *et al.*, 2000).

La cartografía detallada de sedimentos y procesos sedimentarios de los fondos actuales de la Ría de Pontevedra tiene un gran interés desde el punto aplicado, dada su importante actividad industrial, ya que pueden llegar a detectarse posibles zonas de acumulación de contaminantes y diversos tipos de impactos antrópicos no detectables con facilidad por otros métodos. La presencia de contaminantes tales como metales pesados, que mayoritariamente se asocian a los sedimentos finos, pasarían desapercibidos en aquellas áreas de predominio de sedimentos de tamaño grueso, dadas las bajas concentraciones de elementos contaminantes que éstos tienen. No obstante, el pequeño porcentaje de sedimentos finos incorporados en las áreas de gruesos, puede ser muy significativo desde el punto de vista ambiental, ya que los análisis de la fracción fina de estos sedimentos muestran concentraciones de contaminantes comparables a las existentes en los sedimentos finos (Bothner *et al.*, 1992). Además, debido a que al-

gunos organismos bentónicos ingieren preferentemente la fracción fina de los sedimentos gruesos, su nivel de exposición a los contaminantes puede ser la misma que los que habitan en las zonas de sedimento finos.

El impacto antrópico sobre el fondo originado por actividades de arrastre removiliza el sedimento favoreciendo, no sólo la activación de los escapes de gas somero (García-García *et al.*, 1999), sino también la dispersión de contaminantes que pueden alcanzar zonas de interés biológico/económico, tales como las bateas de mejillón, pudiendo pasar a la cadena biológica a través de los organismos filtradores.

CONCLUSIONES

La correlación de los registros de sonar de barrido lateral con los datos de geología de superficie y muestras directas del fondo de la Ría permiten delimitar con precisión los diferentes patrones de reflectividad, así como relacionarlos con la naturaleza de los materiales existentes.

Se distinguen e interpretan los siguientes patrones de reflectividad:

P-1a y 1b, interpretados como afloramientos graníticos dispersos y masivos respectivamente.

P-1c: se interpreta como afloramientos metamórficos.

P-2: se corresponde con texturas gruesas (arenas gruesas y/o gravas), desarrollado en zonas de la Ría sometidas a condiciones de alta energía hidrodinámica.

P-3: se corresponde con texturas finas (arenas finas y/o fangos), desarrollado en zonas sujetas a condiciones de baja energía hidrodinámica.

P-4: se corresponde con rápidas y netas alternancias texturales de arenas gruesas a fangos y viceversa. Se desarrolla bajo condiciones hidrodinámicas altas, pero con fluctuaciones espacio-temporales en la intensidad de las corrientes.

El análisis de estos patrones indica que existe una relación directa entre su distribución espacial y la morfología topografía de la Ría.

Finalmente se elabora una cartografía de alta resolución del fondo de la Ría que permite delimitar los diferentes tipos de fondo: litologías, rasgos estructurales, texturas de sedimentos e impactos antrópicos.

AGRADECIMIENTOS

Este es el trabajo n.º 215 del grupo EX1 de la Universidad de Vigo, siendo una contribución a los proyectos: REN2000-1102 MAR (CIC4T) y PGIDT00PXI30105PR (Xunta de Galicia) y parcialmente al PGIDT00 MAR30103PR (Xunta de Galicia) y IGCP 464. Los autores agradecen a la

Dra. Araceli Muñoz y a la Dra. Margarita Díaz sus constructivas sugerencias, con las que se ha mejorado el manuscrito original.

REFERENCIAS

- ABRIL GÓMEZ, H., ABRIL HURTADO, J., PLIEGO, D.V., CORRETGE, L.G., FLOOR, P., ZAPARTIEL, J.M., GARCÍA SALINAS, F. (1981): Hoja geológica núm. 185 (Pontevedra). *Mapa Geológico de España, E. 1:50.000*. I.G.M.E., Madrid.
- ABRIL HURTADO, J., CORRETGE, L.G., ZAPARTIEL, J.M., GARCÍA SALINAS, F. (1981): Hoja geológica núm. 184 (Grove). *Mapa Geológico de España, E. 1:50.000*. I.G.M.E., Madrid.
- BARNHARDT, W.A., KELLEY, J.T., DICKSON, S.M., BELKNAP, D.F. (1998): Mapping the Gulf of Maine with side scan sonar: a new bottom-type classification for complex seafloors. *Journal of Coastal Research*, 14 (2): 646-659.
- BELDERSON, R.H., KENYON, N.H., STRIDE, A.H., STUBBS, A.R. (1972): *Sonographs of the Sea Floor: A picture Atlas*. Elsevier Scientific Pub. Co., Amsterdam.
- BOTHNER, M.H., PARMENTER, C.M., TWICHELL, D.C., POLLONI, C.F., KNEBEL, H.J. (1992): A Geologic Map of the Seafloor in Western Massachusetts Bay, constructed from digital sidescan-sonar images, photography, and sediment samples. *U.S. Geological Survey Digital Data Series DDS-3*.
- GARCÍA-GARCÍA, A., VILAS-MARTÍN, F., GARCÍA-GIL, S. (1999): A seeping sea-floor in a Ría environment: Ría de Vigo (NW Spain). *Environmental Geology*, 38(4): 296-300.
- GARCÍA-GIL, S., DURÁN, R., VILAS, F. (2000): Side scan sonar image and geologic interpretation of the Ría de Pontevedra seafloor (Galicia, NW Spain). *Scientia Marina* 64(4): 393-402.
- GARCÍA-GIL, S., GARCÍA-GARCÍA, A., VILAS-MARTÍN, F. (1999a): Identificación sísmico-acústica de las diferentes formas de gas en la Ría de Vigo (NO España). *Rev. Soc. Geol. España*, 12 (2): 301-307.
- GARCÍA-GIL, S., VILAS-MARTÍN, F.M., MUÑOZ, A., ACOSTA, J., UCHUPI, E. (1999b): Quaternary sedimentation and thermal diapirism in the Ría de Pontevedra (Galicia), Northwest Spain. *Journal of Coastal Research*, 15(4): 1083-1090.
- GÓMEZ GALLEGU, J., FERNÁNDEZ DEL CASTILLEJO, F., GARCÍA MORÓN, J.M., DÍAZ DEL RÍO, L.A., GONZÁLEZ MUÑOZ, J.L. (1979): *Estudio oceanográfico de la Ría de Pontevedra*. Informe Técnico. Instituto Español de Oceanografía (IEO). Dpto de Oceanografía Física: 1-258
- HÉQUETTE, A., HILL, P.R. (1995): Response of the seabed to storm-generated combined flows on a sandy arctic shoreface, Canadian Beaufort Sea. *Journal of Sedimentary Research*, A65 (3): 461-471.
- HOVLAND, M. (1989): Modern analogues to Middle Ordovician sedimentary mounds and washout depressions. *Journal of Sedimentary Petrology*, 59(4): 585-589.
- HOVLAND, M., JUDD, A.G. (1988): *Seabed Pockmarks and Seepages: Impact on Geology, Biology and Marine Environment*. 293 p., Graham & Trotman, London.
- KING, L. H., MACLEAN, B. (1970): Pockmarks on the Scotian Shelf. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81: 3141-3148.
- KNEBEL, H.J., RENDIGS, R.R., BOTHNER, M.H. (1991): Modern sedimentary environments in Boston Harbor, Massachusetts. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61(5): 791-804.

- KNEBEL, H.J., RENDIGS, R.R., LIST, J.H., SIGNELL, R.P. (1996): Seafloor environments in Cape Cod Bay, a large coastal embayment. *Marine Geology*, 133: 11-33.
- KNEBEL, H.J., SIGNELL, R.P., RENDIGS, R.R., POPPE, L.J., LIST, J.H. (1999): Seafloor environments in the Long Island Sound estuarine system. *Marine Geology*, 155: 277-318.
- KUIJPERS, A., WERNER, F., RUMOHR, J. (1993): Sandwaves and other large-scale bedforms as indicators of non-tidal surge currents in the Skagerrak off Northern Denmark. *Marine Geology*, 111: 209-221.
- LECKIE, D. (1988): Wave-formed, coarse-grained ripples and their relationship to hummocky cross-stratification. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58 (4): 607-622.
- OKYAR, M.R., EDIGER, V. (1997): Sea-floor sediments and bedforms around Turkey, revealed by side-scan sonar imagery. *Oceanologica Acta*, 20 (5): 673-685.
- PAZÓ, X.P. (1987): Producción de semilla de ostra plana (*Ostrea edulis*) por captación natural. *Cuadernos da Área de Ciencias Mariñas, Seminario de Estudos Galegos*, 2: 9-17.
- RAO, P.S. (1989): Sonograph Patterns of the Central Western Continental Shelf of India. *Journal of Coastal Research*, 5 (4): 725-736.
- REY, J. (1993): *Relación morfosedimentaria entre la plataforma continental de Galicia y las Rías Bajas y su evolución durante el Cuaternario*. 232p., Publicaciones Especiales del I.E.O., nº 17.
- RUBIO, H., ABRIL HURTADO, J., GARCÍA SALINAS, F., CORRETGE, L.G., FLOOR, P., ZAPARTIEL, J.M. (1981): Hoja geológica núm. 223 (Vigo). *Mapa Geológico de España, E. 1:50.000*. I.G.M.E., Madrid.
- RUBIO, B., GAGO, L., VILAS, F., NOMBELA, M., GARCÍA-GIL, S., ALEJO, I., PAZOS, O. (1996): Interpretación de tendencias históricas de contaminación por metales pesados en testigos e sedimentos de la Ría de Pontevedra. *Thalassas*, 12: 137-152.
- RUBIO, B., NOMBELA, M., VILAS, F., ALEJO, I., GARCÍA-GIL, S., GARCÍA-GIL, E., PAZOS, O. (1995): Distribución y enriquecimiento de metales pesados de sedimentos actuales de la parte interna de la Ría de Pontevedra. *Thalassas*, 11: 35-45.
- RUIZ MATEO, A., RODRÍGUEZ HERRERÍAS, M., MARTÍNEZ ARANZÁBAL, J.L. (1980): *Estudio de la Contaminación de la Ría de Pontevedra (SCORP I)*. 425p. Informe Técnico. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid.
- RUIZ-MATEO, A. (1983): *Dinámica marina de la Ría de Pontevedra*. 20p. Cuadernos de Investigación del Centro de Estudios e Investigación de Obras Públicas. Madrid.
- SCHWAB, W.C., ALLISON, M.A., CORSO, W., LOTTO, L.L., BUTMAN, B., BUCHHOLTZ TEN BRINK, M., DENNY, J.F., DANFORTH, W.W., FOSTER, D.S. (1997): Initial results of high resolution seafloor mapping offshore of the New York-New Jersey metropolitan area using sidescan sonar. *Northeastern Geology & Environmental Sciences*, 19(4): 243-262.
- SCHWAB, W.C., RODRIGUEA, R.W., DANFORTH, W.W., GOWEN, M.H. (1996): Sediment distribution on a Storm-dominated Insular Shelf. Luquillo, Puerto Rico, U.S.A. *Journal of Coastal Research*, 12 (1): 147-159.
- SCHWAB, W.C., THIELER, R., ALLEN, J.S., FOSTER, D.S., SWIFT, A., DENNY, J.F., DANFORTH, W.W. (in press). Geologic mapping of the nearshore area offshore Fire Island, New York *Proceedings of Coastal Sediments*.
- TECNOLOGÍA AMBIENTAL, S.A. (1991): *Guía metodológica para la elaboración de estudios de impacto ambiental*. 185 p. Xunta de Galicia, Dirección Xeral de Calidade Medioambiental e Urbanismo, Consellería de Ordenación do Territorio e Obras Públicas.
- VILAS, F., GARCÍA-GIL, E., GARCÍA-GIL, S., NOMBELA, M.A., ALEJO, I., RUBIO, B., PAZOS, O. (1996): *Cartografía de sedimentos submarinos, Ría de Pontevedra. E: 1:5000*. Ed. Xunta de Galicia, Consellería de Pesca, Marisqueo e Acuicultura, Santiago de Compostela.