



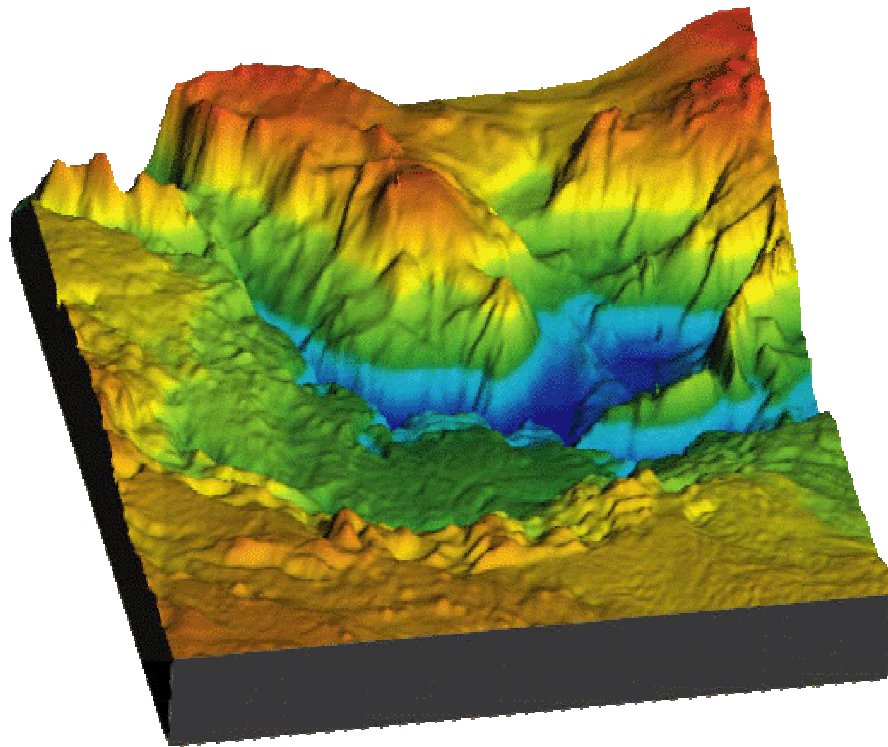
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES



TOPOGRAFÍA Y FOTOGRAMETRÍA  
6º CURSO MECÁNICA (CONSTRUCCIÓN)

---

# CARTOGRAFÍA SUBMARINA



Juan Antonio Caballero Sánchez  
97070

**CARTOGRAFÍA SUBMARINA**

Juan Antonio Caballero Sánchez. 97070

6º CURSO MECÁNICA (CONSTRUCCIÓN)

**TOPOGRAFÍA Y FOTOGRAMETRÍA**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES**

## ÍNDICE

0 Índice	2
0 Presentación	3
1 Introducción a la cartografía submarina.	
1.1 Intereses y aplicaciones	4
1.2 Analogías y diferencias con la cartografía terrestre	8
1.3 Distintas zonas de estudio	9
1.4 Clasificación según la Organización Hidrográfica Internacional	14
1.5 Organismos y empresas	15
2 Metodología de toma de datos: batimetría y posicionamiento	17
2.1 Consideraciones previas	18
2.2 Equipamientos acústicos.	20
2.3 Posicionamiento por GPS diferencial (DGPS)	26
2.4 Batimetría por satélite	28
3 Herramientas, proceso de datos y métodos.	31
3.1 Procesado de datos por caracterización del fondo: segmentación.	31
3.2 Eliminación de datos recurrentes para la optimización del proceso	34
4 Representación cartográfica del fondo marino.	37
4.1 Cartas batimétricas para navegación	40
4.2 Cartas batimétricas para pesca	42
5 Aplicación de la cartografía submarina: líneas de cable y ductos (gasoductos, oleoductos y poliductos).	44
5.1 Tendido de cables	44
5.2 Instalación de ductos	47
6 Conclusiones	51
7 Bibliografía, documentación, páginas web y contactos.	53
8 CD-ROM	56

## 0 PRESENTACIÓN

Este trabajo trata de ser una introducción a la cartografía submarina y al amplio campo de estudio y análisis que representa. Por ello, recoge información de todo el proceso. En primer lugar, el capítulo introductorio da una vista global de las aplicaciones principales y el marco actual de la cartografía submarina. A continuación, se detallan los procedimientos de toma de datos y posicionamiento que se emplean actualmente: sondas, GPS diferencial, etc. Se introduce después el tratamiento informático de los datos, haciendo hincapié en dos de los aspectos más relevantes del procesado de los datos: la corrección de errores y la eliminación de datos recurrentes. Luego se introduce la cartografía submarina que existe actualmente, los distintos tipos de cartas batimétricas y algunos casos de simbología, etc. que se emplean. Y por último, algunas aplicaciones de la cartografía submarina. He escogido el tendido de líneas submarinas, y conductos para el transporte de gas, petróleo, etc., por ser a mi modo de ver el caso más claro de aplicación de las técnicas estudiadas. Además, representa en la actualidad la principal aplicación a la ingeniería de la cartografía submarina. No obstante, en la introducción se detallan algunas otras aplicaciones de interés.

Aunque en el mercado existen numerosas empresas dedicadas a este sector, son muy celosas a la hora de proporcionar información, y la documentación sobre el tema es relativamente escasa. Sólo existen trabajos de carácter divulgativo y científico proporcionados por instituciones oficiales (en su mayoría, extranjeras), y las empresas del sector no proporcionan su información con facilidad. Por ese motivo este trabajo es una recopilación de información proveniente de numerosos estudios (que se incluyen en formato digital en el CD-ROM adjunto, y en la bibliografía) en su mayoría extranjeros.

Por último, me gustaría agradecer al personal del Instituto Español de Oceanografía, y en especial a los empleados del Centro de Documentación de la Avda. de Brasil, en Madrid, por su paciencia y colaboración.



## 1 INTRODUCCIÓN A LA CARTOGRAFÍA SUBMARINA

### 1.1 INTERESES Y APLICACIONES

Desde mediados del siglo XIX, navieros y oceanógrafos han intentado mejorar sus conocimientos sobre la orografía y naturaleza del fondo marino. En la actualidad, el estudio de la morfología del fondo marino es de gran interés tanto en diversos campos de la ciencia y tecnología, como a nivel industrial. Esto ha hecho que se hayan realizado, y se sigan realizando numerosos experimentos en el campo de la geofísica, geoquímica y biología relacionados con el estudio de este medio, cuyos resultados y análisis son de gran ayuda para otros campos entre los que se encuentra la ingeniería.

Las técnicas y métodos de cartografía submarina son tan variados y complejos como los utilizados en cartografía y topografía terrestre. La evolución de estos estudios y sus resultados van parejos a la evolución tecnológica, movida por dos motores básicos: El económico, centrado en la búsqueda de yacimientos submarinos minerales y de petróleo, y la defensa nacional impulsada por las guerras mundiales con el descubrimiento y desarrollo de ecosondas o el radar.

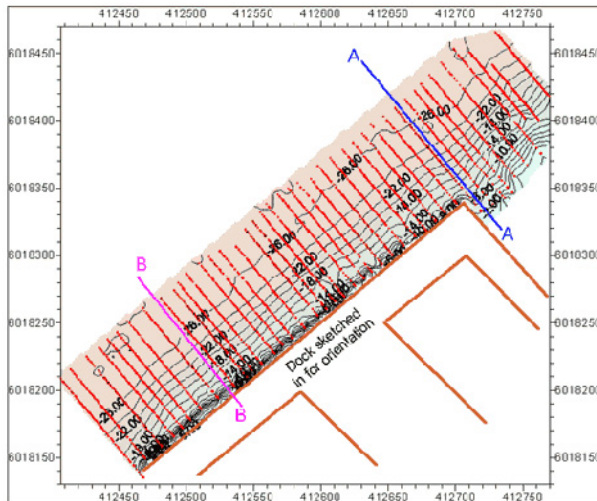
La primera carta batimétrica moderna se realizó en 1965, por los americanos Heezen y Tharp. Desde entonces, la aparición de nuevas tecnologías tanto de medición como de posicionamiento (GPS y GPS diferencial o DGPS), han permitido ampliar la resolución y calidad de este tipo de representaciones cartográficas llegando incluso a resoluciones próximas al centímetro. Estos avances serían equiparables a los debidos al desarrollo de la fotogrametría en el campo de la cartografía terrestre. Asimismo, la evolución de los equipos informáticos y las técnicas de representación gráfica permiten crear modelos digitales del terreno y cartas con distintos niveles de precisión y resolución, según las necesidades de cada campo concreto. Esta evolución ha supuesto la posibilidad de eliminar ruidos de manera más efectiva, que conducen a modelos más precisos. Esto, unido a las posibilidades de equipos informáticos más potentes, ha permitido interpretar de manera más atractiva, y de más fácil comprensión los fondos marinos.

En obras de ingeniería, las aplicaciones principales son:

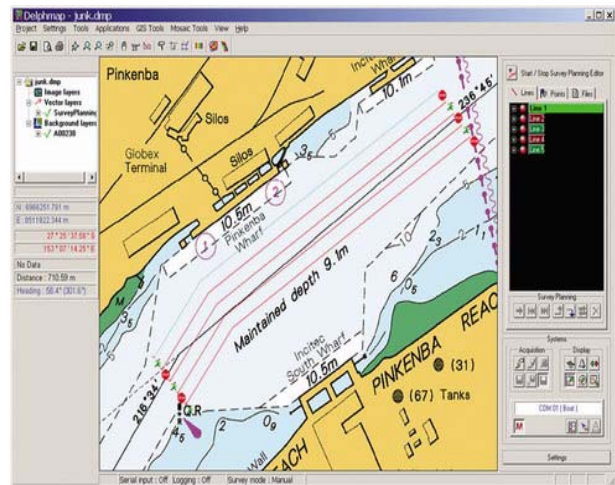
- obras portuarias, tanto en la construcción de nuevos proyectos (Figura 1) como en rehabilitación, drenado, ampliación, o trabajos de otros ya existentes (Figuras 2 y 3).
- emplazamiento de los rompeolas, espigones, etc. en puertos y zonas costeras mediante el estudio de la influencia de la orografía en los movimientos de agua.
- simulación y predicción de movimientos de agua en zonas de interés, a través de modelos matemáticos y a partir de modelos digitales del terreno
- tendidos de líneas subacuáticas, como pueden ser líneas eléctricas y fibra óptica (antiguamente también líneas telegráficas), u otro tipo de conductos como gasoductos, oleoductos, etc. (Figuras 4 y 5). Estas aplicaciones se verán con más detalle al final del documento.
- prospecciones petrolíferas, tanto en tareas de análisis de las posibilidades de una zona,

como del emplazamiento de las plataformas en sí.

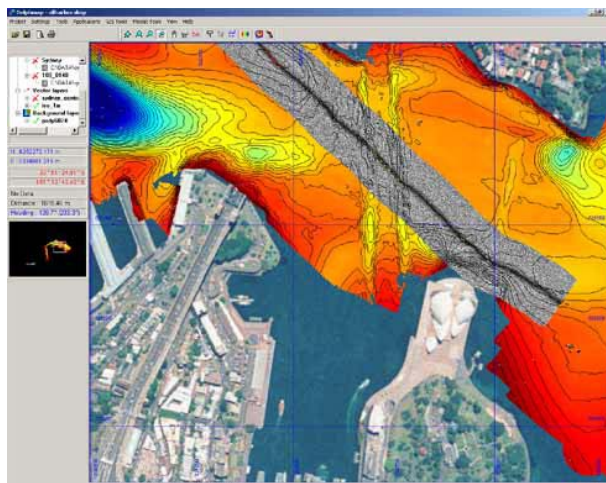
- navegación y posicionamiento de equipos ROV (*Remote Operated Vehicle*) y sumergibles tripulados, y seguimiento durante y después de la inmersión. (Figura 6).
- optimización de transportes navales, mediante el estudio de las mejores alternativas a partir de modelos digitales del terreno.



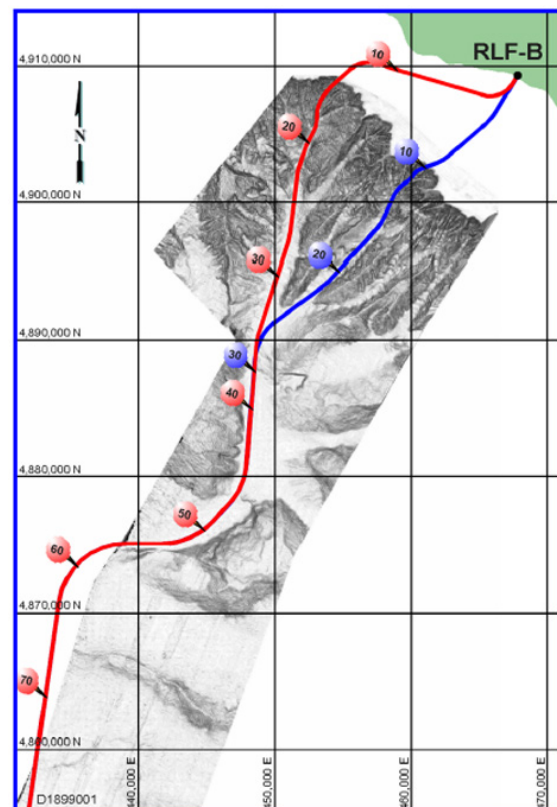
▲ Fig. 1: Batimetría de una zona portuaria. La línea roja representa el dique.



▲ Fig. 2: Aplicación informática para drenado de un puerto tras una batimetría.



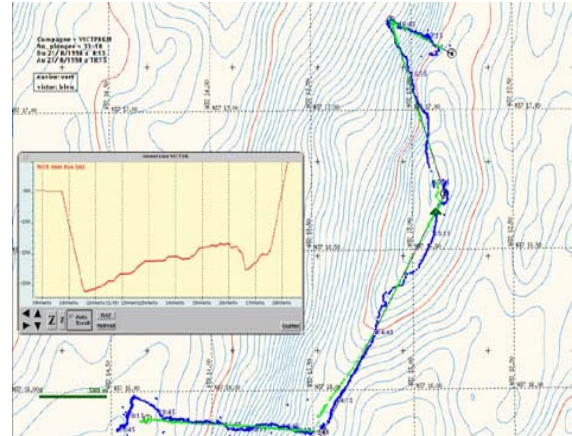
▲ Fig. 3: Aplicación informática para mantenimiento de puertos, que implementa cartas y sondeos.



▲ Fig. 4: Tendido de un conducto submarino, en el que se ven los distintos tramos.



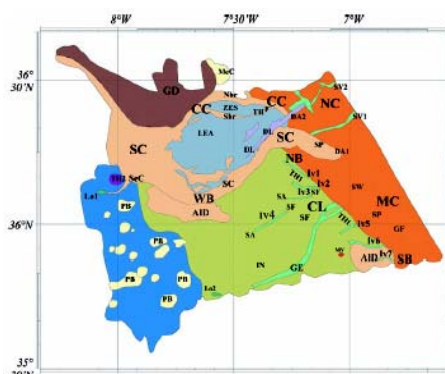
▲ Fig. 5: Seguimiento por sonda de un conducto submarino. Se aprecia la zona explanada.



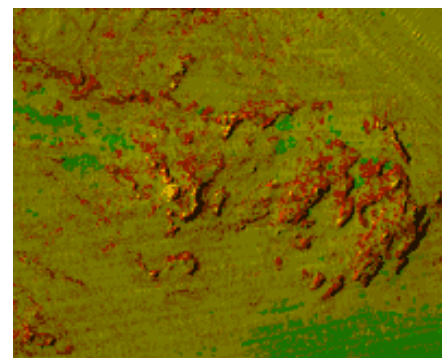
▲ Fig. 6: Aplicación para seguimiento de un ROV mediante de cartografía submarina.

Sin embargo, la cartografía del fondo marino es de aplicación en otros muchos campos:

- estudio y determinación de posibles vías de depósito y movimiento de sedimentos para analizar el riesgo de movimientos de los mismos, e identificar vías de deposición de contaminantes en caso de vertido (Figura 7).
- la biología, tanto en estudios de especies bentónicas, algas y fanerógamas marinas, como en evaluaciones de impacto ambiental. En la Figura 8, se ha determinado que las zonas rojas representan roca, las naranjas arenas compactas, las amarillas arenas, y las verdes fango.
- estudio de los movimientos tectónicos, erupciones volcánicas, etc.
- determinación de volúmenes; en la Figura 9, se determinan zonas peligrosas en un área de alta densidad de tráfico naval, en Central San Francisco Bay, California representadas por las zonas coloreadas. Con el software adecuado se pueden determinar qué partes eliminar para disminuir el riesgo de colisión en la zona.
- localización de pecios y restos de naufragios, u otros objetos como minas, etc. (Figura 10).
- identificación de zonas pesqueras (Figura 11).

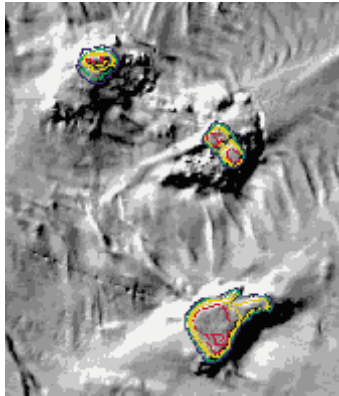


▲ Figura 7: Estudio de la sedimentación a partir de una batimetría, en una zona del Golfo de Cádiz.

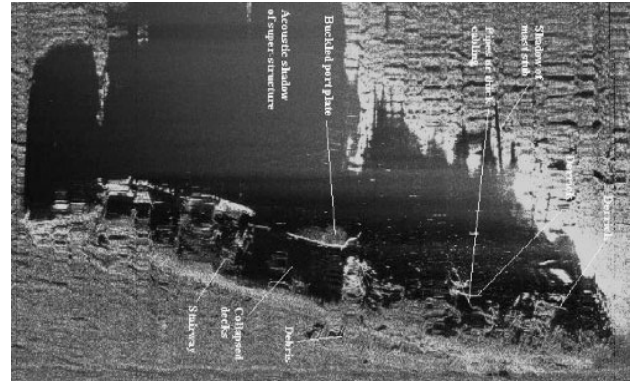


▲ Figura 8: Respuesta batimétrica para el estudio biológico de una zona.

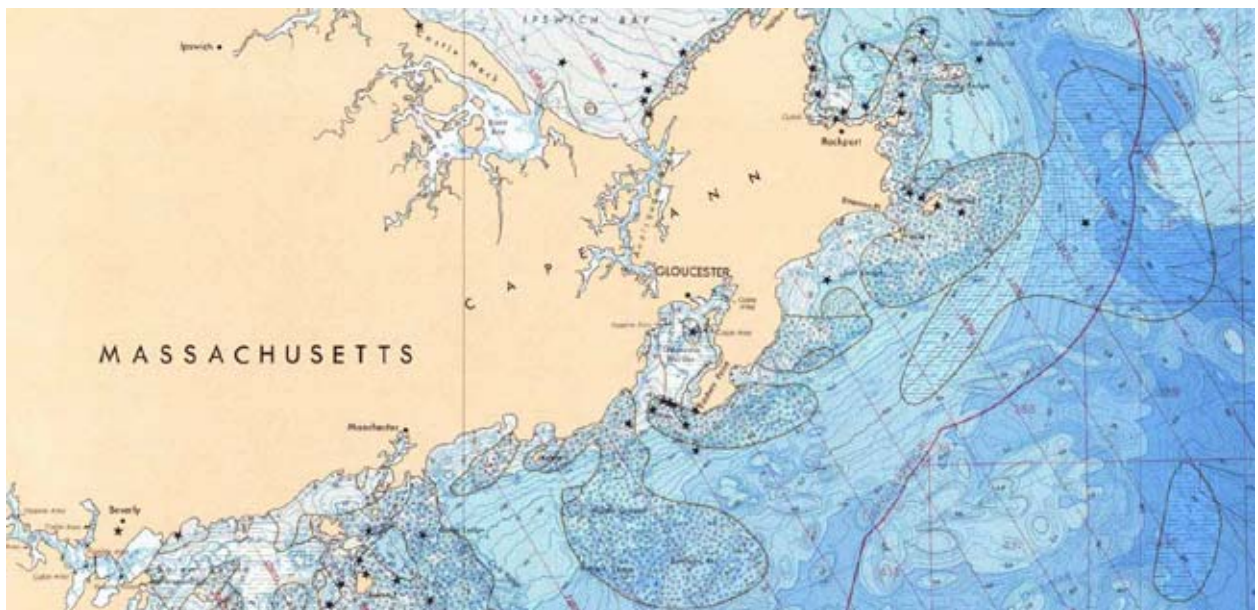




▲ Figura 9: Zonas potenciales de peligro para el paso de embarcaciones.



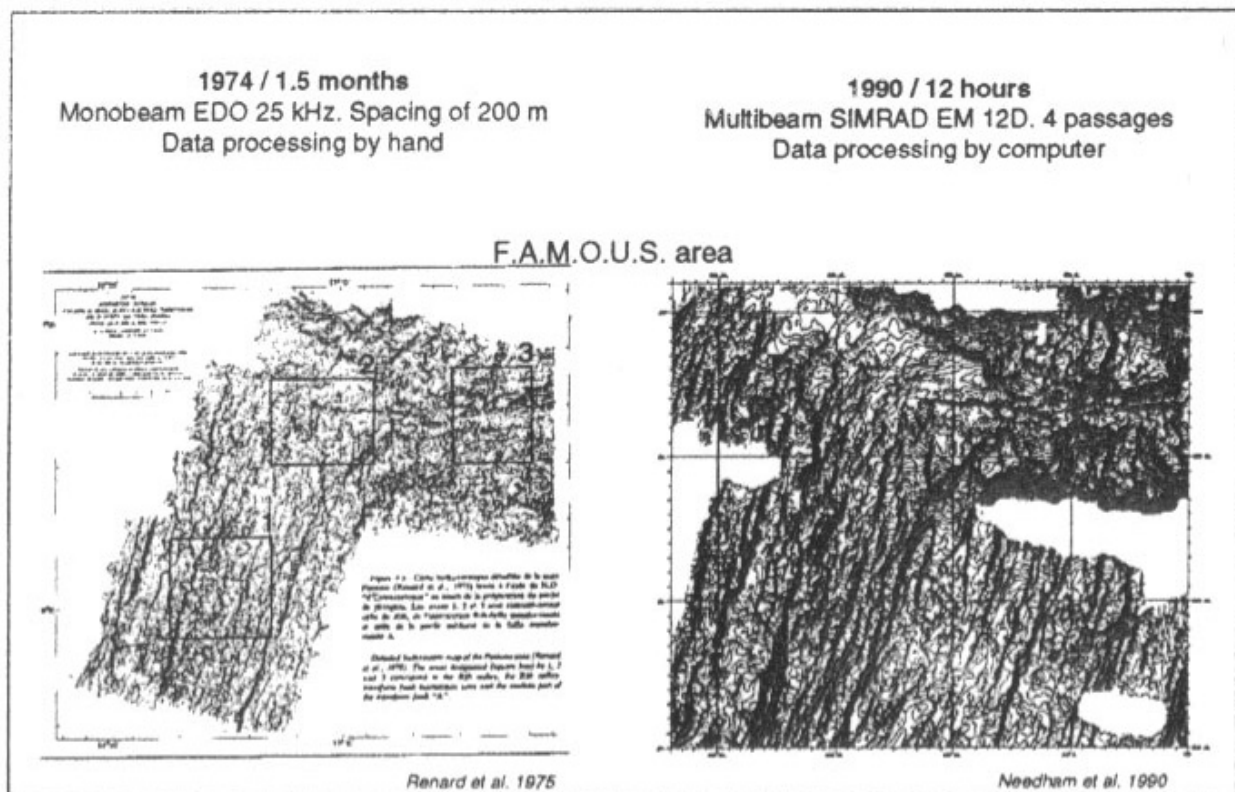
▲ Figura 10: Imagen obtenida con sonda de muy alta frecuencia (500 kHz) de un pecio.



▲ Fig. 11: Detalle de un mapa batimétrico para pesca de NOAA para US Department of Commerce, a escala 1:100000. La nomenclatura se explicará más adelante.

\* \* \*

Históricamente, existen numerosas diferencias entre los estudios batimétricos y de posicionamiento necesarios para producir un mapa del fondo marino que se tenían que llevar a cabo en los años 70, y en la actualidad. La Figura 12 compara los resultados para una misma zona en el tiempo. En el primer caso, se requería el trabajo manual de numerosos científicos durante aproximadamente un mes y medio, empleando sondas monohaz. Actualmente, el mismo trabajo se puede llevar a cabo en unas 12 horas usando una sonda multihaz y un sencillo equipo informático. Aparte de la reducción de tiempo, coste y mano de obra, la precisión y las posibilidades de los resultados obtenidos con los nuevos equipos son notoriamente superiores.



▲ Fig. 12: Comparación de las batimetrías en una misma zona, en los años 70 y en los 90.

Sin embargo, aún queda mucho por hacer en el campo de la cartografía submarina, como se verá a lo largo de todo el texto y se resumirá en las conclusiones.

## 1.2 ANALOGÍAS Y DIFERENCIAS CON LA CARTOGRAFÍA TERRESTRE

Aunque a primera vista pueda parecer que cartografiar el fondo marino sea muy similar a hacerlo sobre la superficie terrestre, esta similitud se reduce a la representación mediante líneas de igual cota y al tratamiento informático de los modelos digitales del terreno.

Sin embargo, y como se verá a lo largo del texto, la toma de datos sigue procedimientos totalmente distintos. Existen distintos tipos de sonda para realizar las batimetrías (medidas de profundidad, como veremos más adelante), cada uno de ellos con una problemática asociada y la necesidad de adoptar distintas soluciones en cada caso. Estas sondas se basan en respuestas acústicas, y el uso de la fotogrametría queda relegado a casos muy concretos, y conlleva gran cantidad de problemas asociados.

El medio marino presenta en sí numerosos retos, como son las distintas propiedades del agua y la variabilidad de las mismas en función de la profundidad, posición, corrientes... Eso hace que la toma de datos sea más complicada, y requiera en muchos casos una metodología específica. Por todas estas causas, poco más de un 10% de los fondos marinos están cartografiados en detalle,

si bien los nuevos avances técnicos y las batimetrías realizadas desde satélite (mediante técnicas gravimétricas y magnetométricas, que cada vez permiten mayores resoluciones) están acelerando el conocimiento de este medio.

### 1.3 DISTINTAS ZONAS DE ESTUDIO

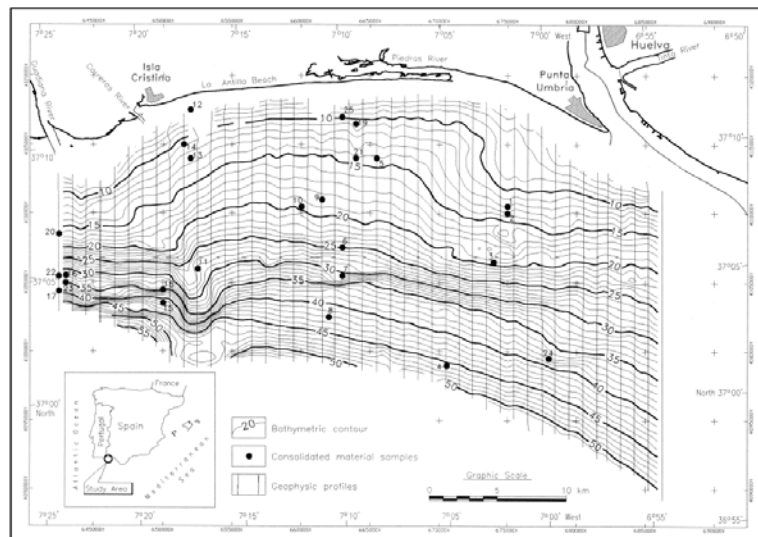
En primer lugar, hay que dividir el entorno marino en tres zonas muy distintas entre sí, en cuanto a características de la zona, tecnología necesaria, etc.:

- litoral
- márgenes costeras
- corteza oceánica

#### Litoral

Las zonas de litoral suelen verse afectadas por la acción de las corrientes, la erosión, el transporte y depósito de sedimentos, y la actividad humana (contaminación, infraestructuras...). Existen problemas específicos en las zonas costeras. Si consideramos las zonas menos profundas del mar (con una profundidad inferior a los 20 m), cartografiarlas no es sencillo

debido a la continua acción del hombre (el tráfico continuo de embarcaciones recreativas, de pesca, de transporte; la creación de infraestructuras, extracciones para playas...), la acción de las mareas y sus movimientos, etc. Para no considerar el efecto de las mareas, el nivel del mar se mide respecto al nivel medio de la bajamar (conocido como **MLLW**, *Mean Lower Low Water*)



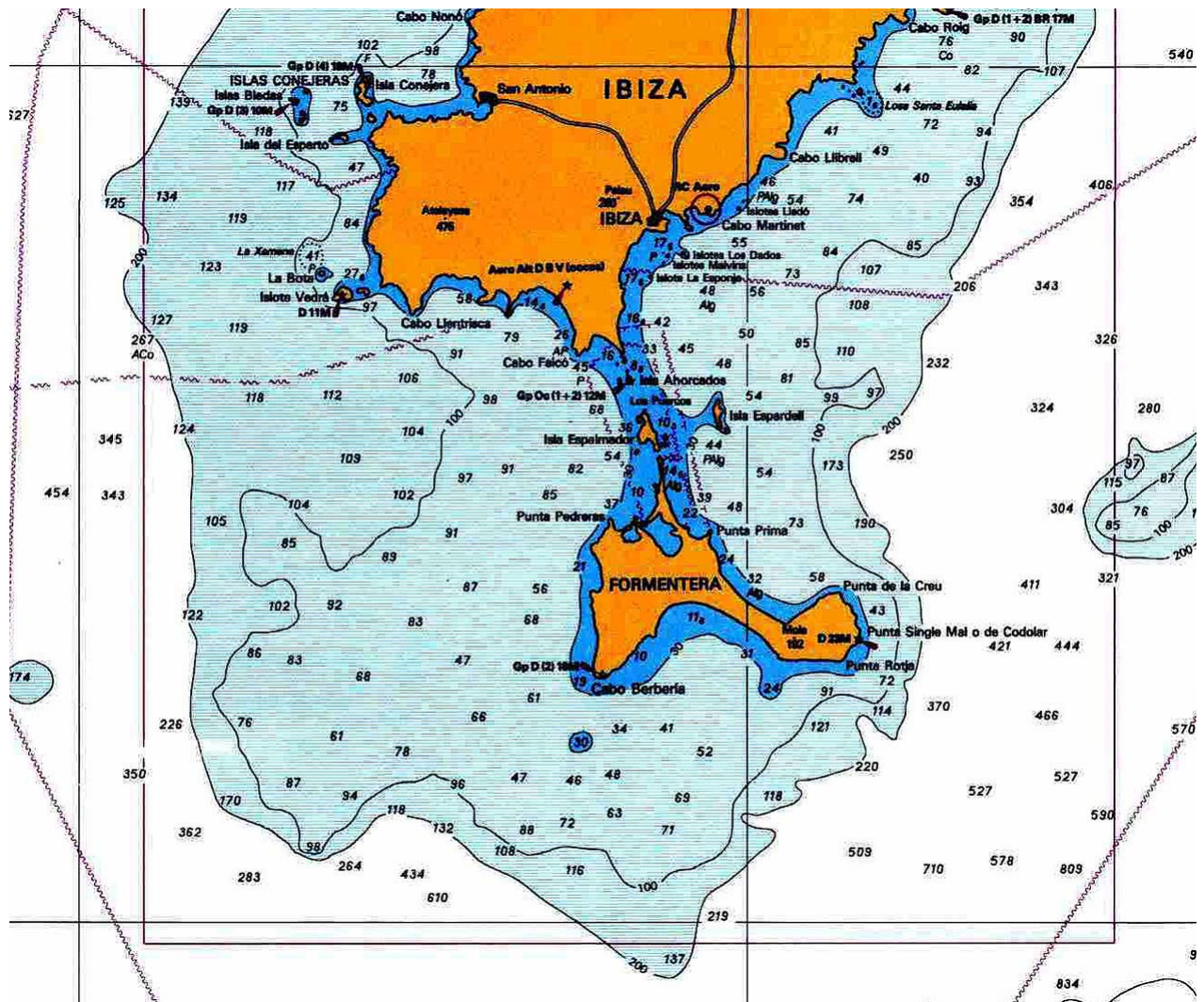
▲ Figura 13: Batimetría y localización de una zona costera

#### Márgenes costeras

Las márgenes costeras son los lugares dónde tiene lugar la mayor parte de los procesos de sedimentación. Es el área de mayor interés para el seguimiento de cambios de nivel del mar, terremotos, emanación de gases, inestabilidad de capas terrestres, corrientes, etc. Además, es la zona en la que se estudian la mayor parte de las actividades de interés para la industria, como por ejemplo las prospecciones petrolíferas. Recientemente y gracias a estudios cartográficos de la zona, se han descubierto enormes deslizamientos de placas sedimentarias en las márgenes costeras del noroeste del Mar Mediterráneo (zona Balear, estudios de Rothwell et al., 1998), debidas quizás a la emanación de grandes masas gaseosas de cortezas inferiores. Los desplazamientos bruscos de



estas placas, o su hundimiento, pueden provocar efectos sísmicos y tsunamis. Esto, unido al conocimiento de otros acontecimientos históricos (tsunami en Lisboa, en 1755) hace necesarios estudios más concisos de estas zonas a la hora de implantar cualquier tipo de actividad en ellas. Pero estos estudios además pueden ayudar a encontrar reservas de gas, que pueden ser explotables por el hombre.



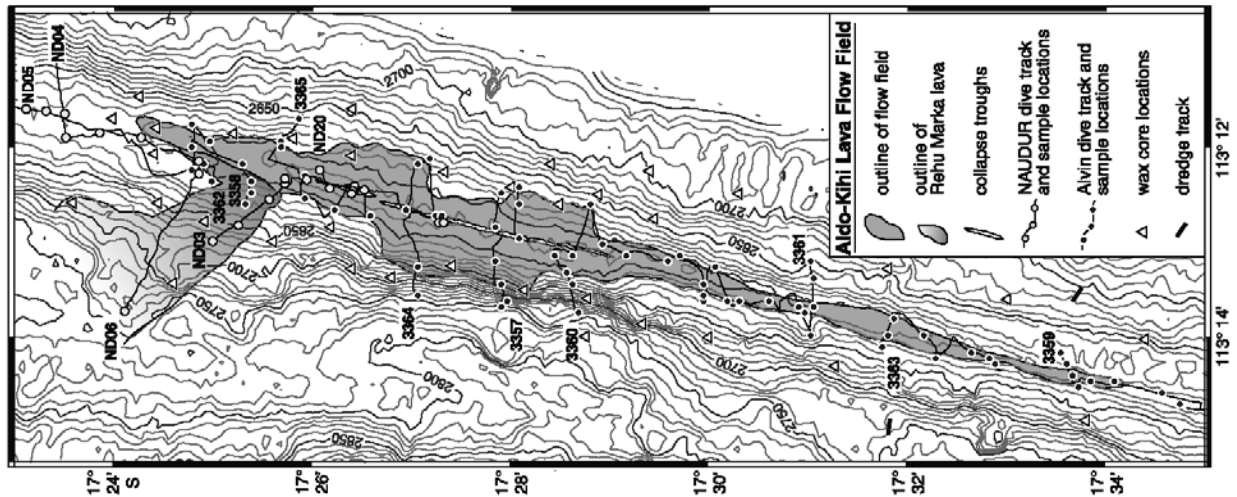
▲ Figura 14: Detalle de la batimetría del Instituto Hidrográfico de la Marina Española del área “Cabo Tiñoso a Cabo Canet con las islas de Ibiza, Formentera y Cabrera y Sudoeste de Mallorca” a escala 1:350.000

### Corteza Oceánica

Se conoce como corteza oceánica (*Oceanic Crust*) aquella zona de la litosfera que comprende los fondos marinos más profundos, y en los que la corteza terrestre no suele superar los 10Km.

El conocimiento y cartografía de la corteza medio-oceánica ha sido especialmente detallado.

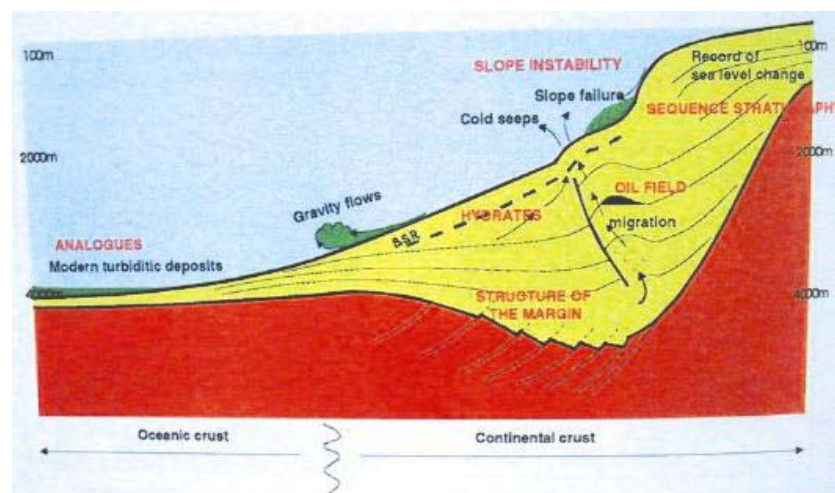
Ello ha conducido a numerosos avances en el campo de la cartografía submarina, que han llevado a avances en los sistemas de estudio y análisis de los mecanismos de sedimentación, conduciendo a una mejora en los sistemas de búsqueda de yacimientos petrolíferos a gran profundidad.



▲ Figura 15: Batimetría de una zona de gran actividad volcánica, en la corteza oceánica.

El estudio de la corteza oceánica ha de llevarse a cabo tanto a escala global, como mediante cartografías locales, lo que ha llevado a un desarrollo de metodología y aparatos concretos para este tipo de estudios.

El ejemplo más claro que ilustra este tipo de estudios, y cuyos resultados son extrapolables a muchos otros, es el de la anomalía de las Azores. La unión entre las placas Norteamericana, Africana y Europea se produce en este punto. Por ello, en esta zona quedan expresados geológicamente numerosos procesos tectónicos, tanto a nivel profundo como superficial. La actividad tanto sísmica y volcánica como hidrotermal y biológica es particularmente reseñable, y se resume en la Figura 16. El conocimiento y la comprensión de estos procesos van estrechamente unidos a un conocimiento cartográfico, batimétrico y geomorfológico muy completo del fondo marino. Esto implica la necesidad de cartografías a distintas escalas, y a veces con un detalle centimétrico algunas áreas, por lo que gran cantidad de los avances en este campo se han realizado gracias a estudios en esta zona. Pero el estudio detallado de la anomalía de las Azores lleva asociado



▲ Figura 16: Principales procesos geológicos que tienen lugar en la corteza oceánica.



muchos años de trabajo, aun por hacer, y el análisis de datos recogidos a lo largo de todo ese tiempo, para poder describir las variaciones topográficas de esta parte tan activa del océano.

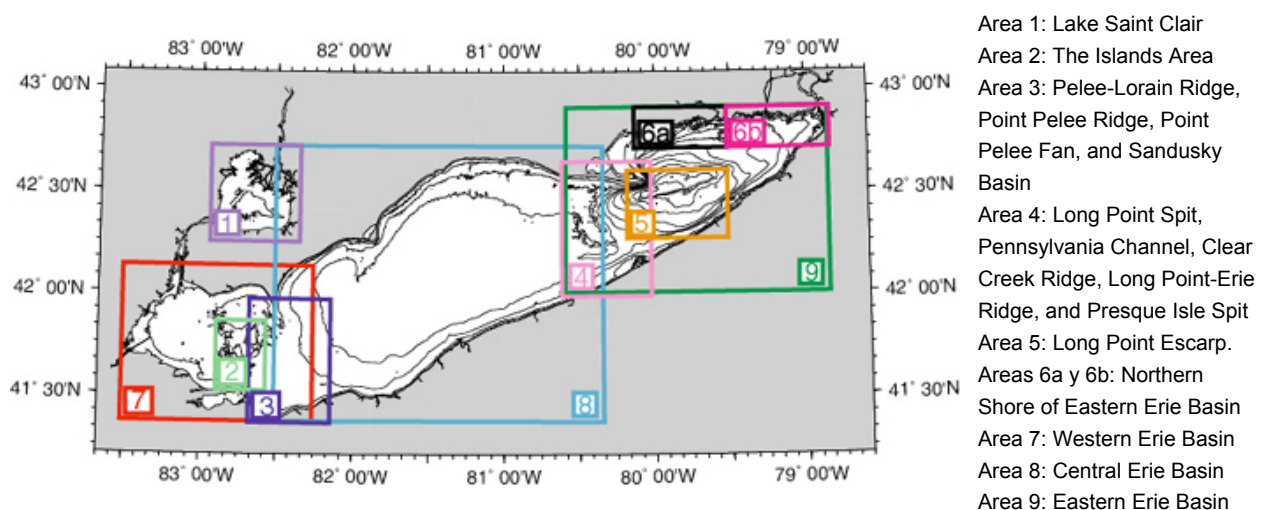
El interés por estos estudios no es únicamente científico, sino que son de gran aplicación para el desarrollo de la actividad humana a escala mundial.

### Otras aguas

En casos determinados, el estudio cartográfico de las aguas interiores también puede ser interesante, puesto que pueden desarrollarse obras de todo tipo. Este es el caso de lagos, presas y ríos navegables.

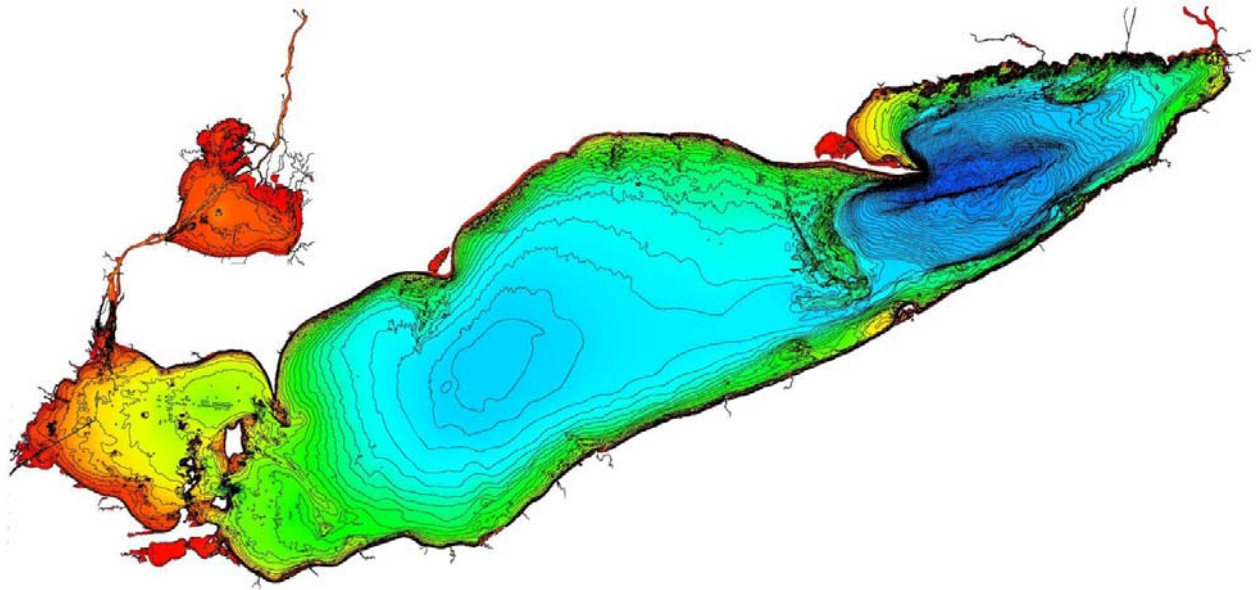
El interés de estas bases de datos batimétricas y cartográficas es, por un lado, el conocimiento de la geomorfología de los fondos que permite predecir los movimientos de aguas, lo que es de gran utilidad para el desarrollo de obras portuarias, y las comunicaciones navales. Además, esto ayuda en el control de la contaminación de los mismos. Pero también es de interés el estudio de la erosión de las zonas costeras, el análisis y optimización de los recursos pesqueros, etc.

Un ejemplo de estudio cartográfico completo de aguas interiores son los Grandes Lagos, cartografiados por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) en colaboración con el *Great Lakes Environmental Research Laboratory* y el *Canadian Hydrographic Service*. Los lagos, y sus comunicaciones fluviales, están cartografiados a distintas escalas, que van desde 1:350000, 1:200000 y 1:100000, hasta 1:2500 en las áreas de mayor interés. A modo de ejemplo, tomamos los lagos Erie y Saint Clair, cuyas cartas se muestran en la imagen:



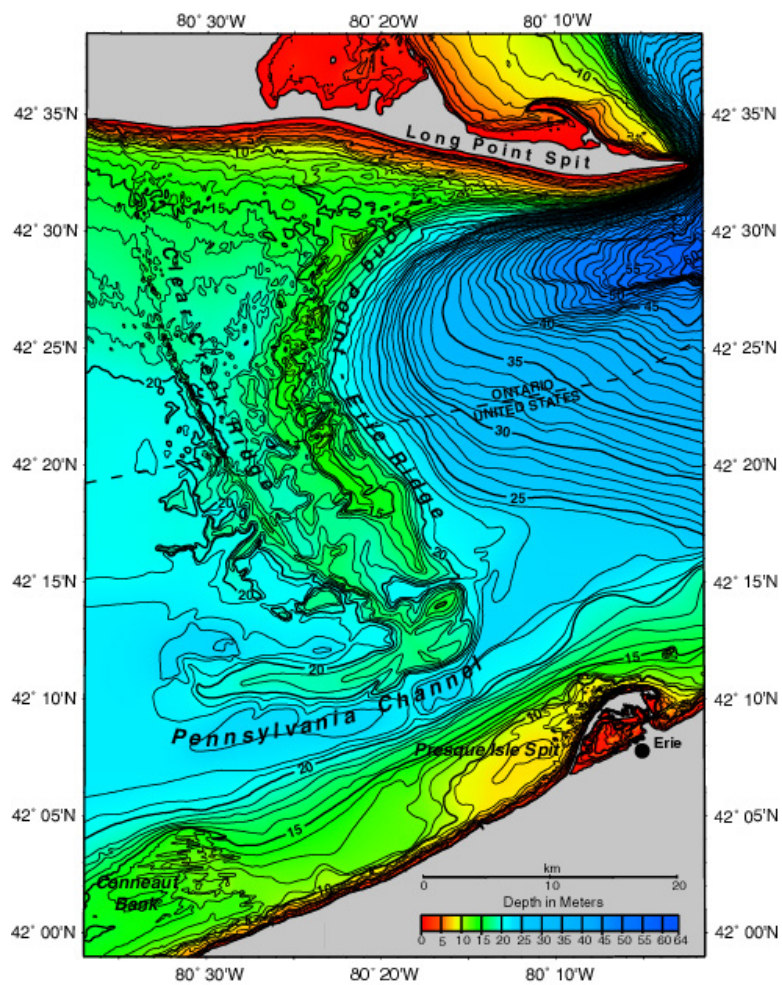
▲ Figura 17: Distribución zonal de las Cartografías de los lagos Erie y Saint Clair.

A continuación se muestra, a modo de ejemplo, la batimetría de conjunto del lago



▲ Figura 18: Batimetría general de la zona cartografiada

y una imagen de una zona concreta (área 4)



▲ Figura 19: Batimetría de la zona 4

## 1.4 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA ORGANIZACIÓN HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL

Para clasificar de una manera sistemática los diferentes requerimientos de precisión en las áreas que deben ser levantadas, se han definido cuatro órdenes de levantamientos.

**Orden Especial** - Los levantamientos hidrográficos de Orden Especial se aproximan a las normas de ingeniería y la intención es que su uso se limite a áreas críticas específicas con un margen mínimo bajo la quilla y donde las características del fondo sean potencialmente peligrosas para las embarcaciones. Estas áreas deben ser determinadas explícitamente por la organización responsable de la calidad del levantamiento. Son ejemplos de las mismas puertos, fondeaderos, y canales críticos asociados. Todas las fuentes de error deben ser minimizadas. El Orden Especial requiere el uso de líneas de sonda poco separadas, junto con el uso de sonar lateral, equipos multitransductores o sondas acústicas multihaz de alta resolución, para conseguir una cobertura del 100% del fondo. Debe asegurarse que las formas cúbicas mayores de 1 m puedan ser discriminadas por el equipo de sondeo. El uso de sonar lateral junto con una sonda acústica multihaz puede ser necesario en áreas donde puedan encontrarse obstáculos delgados y peligrosos.

**Orden 1** - Los levantamientos hidrográficos de Orden 1 están concebidos para puertos, canales de acceso a puertos, derrotas recomendadas, canales de navegación interior, y áreas costeras de alta densidad de tráfico comercial donde el margen bajo la quilla es menos crítico y las propiedades geofísicas del fondo son menos peligrosas para las embarcaciones (por ejemplo, fondo de arena o lodo blando). Los levantamientos de Orden 1 deberían limitarse a áreas con una profundidad menor de 100 m. Aunque los requerimientos para la investigación del fondo son menos rígidos que los correspondientes al Orden Especial, se requiere una cobertura total del fondo en áreas seleccionadas donde las características del fondo y el riesgo de obstrucciones son potencialmente peligrosos para las embarcaciones. Para estas áreas, debe asegurarse que las formas cúbicas mayores de 2 m puedan ser discriminadas por los equipos de sondeo en profundidades de hasta 40 m o que en áreas investigadas más profundas se puedan detectar los obstáculos que superen, en dimensión, el 10% de la profundidad.

**Orden 2** - Los levantamientos hidrográficos de Orden 2 se proponen para áreas de profundidad menor que 200 m no cubiertas por el Orden Especial o el Orden 1, y en las que una descripción general de la batimetría es suficiente para asegurar que no existen obstrucciones en el fondo que pudieran poner en peligro las embarcaciones que se supone transitarán o trabajarán en el área. Este es el criterio para una variedad de usos marítimos para los cuales no se justifican levantamientos hidrográficos de órdenes superiores. Puede requerirse una investigación total del fondo en áreas seleccionadas donde las características del fondo y el riesgo de obstrucciones puedan ser potencialmente peligrosos para las embarcaciones.

**Orden 3** - Los levantamientos hidrográficos de Orden 3 se proponen para todas las áreas no cubiertas por el Orden Especial y los Ordenes 1 y 2, en profundidades mayores a 200 m.

La siguiente tabla muestra los parámetros requeridos para cada uno de los tipos:

ORDEN	ESPECIAL	1	2	3
<b>Ejemplos</b>	Puertos, áreas de amarre y canales críticos asociados con márgenes mínimos bajo la quilla	Puertos, canales de acceso a puertos, derrotas recomendadas y ciertas áreas costeras con profundidades de hasta 100 m	Áreas no descritas en Orden Especial y Orden 1, o áreas de hasta 200 m de profundidad	Zonas costa afuera no descritas en Orden Especial, y Ordenes 1 y 2
<b>Exactitud Horizontal (95%)</b>	2 m	5 m + 5% de la profundidad	20 m + 5% de la profundidad	150 m + 5% de la profundidad
<b>Exactitud para la profundidad reducida (95%) (*)</b>	a=0,25 m b=0,0075	a=0,5 m b=0,013	a=1,0 m b=0,023	
<b>Investigación del 100% del fondo</b>	Obligatorio	Requerido en áreas seleccionadas	Puede ser requerido en áreas seleccionadas	No aplicable
<b>Capacidad del sistema de detección</b>	Formas cúbicas > 1 metro	Formas cúbicas > 2 metros en profundidades de hasta 40 m; 10% de las profundidades mayores de 40 m		No aplicable
<b>Máxima separación entre líneas</b>	No aplicable, dada la obligación de una investigación del 100%	3 x profundidad promedio ó 25 m, la que sea mayor	3-4 x profundidad promedio ó 200 m, la que sea mayor	4 x profundidad promedio

(\*) Para calcular el límite del error en la exactitud de la profundidad, los valores correspondientes de "a" y "b" dados en la tabla deben ser introducidos en la fórmula

$$\sqrt{a^2 + (b \cdot d)^2}$$

a: error de profundidad constante (por ejemplo: la suma de todos los errores constantes)

b\*d: error dependiente de la profundidad

b: factor del error dependiente de la profundidad

d: profundidad

## 1.5 ORGANISMOS Y EMPRESAS

Existen numerosas organizaciones y empresas que realizan cartografías submarinas. El motivo es, en el ámbito estatal, crear una fuente de información general y/o base de datos de las zonas económicas exclusivas así como cartas de navegación, cartas de pesca, etc. Asimismo, existe gran cantidad de empresas privadas que realizan cartografías a escala local para obras concretas, o bien para estudios de sedimentación, biotopos, parques naturales, etc. En cualquier caso, la contratación es, la mayor parte de las veces, por parte del Estado u organismos asociados.

A escala mundial, destacan

- *Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer* (IFREMER)
- *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA)

- *U.S. Geological Survey (USGS)*
- *International Federation of Hydrographic Societies*

En España existen distintas cartografías submarinas generales, editadas por varios organismos oficiales. El Instituto Español de Oceanografía (IEO) edita dos series cartográficas, una sobre la Zona Económica Exclusiva Española (ZEEE) y otra sobre la Plataforma Continental Española (Proyecto SPACE). Otra cartografía marina, la edita el Instituto geológico y Minero de España. Y, por último, la oficial para navegación son las cartas náuticas editadas por el Instituto Hidrográfico de la Marina. También realizan labores cartográficas a nivel experimental y de investigación la Unidad de Tecnología Marina del CSIC y el instituto de Ciencias del Mar del mismo organismo.

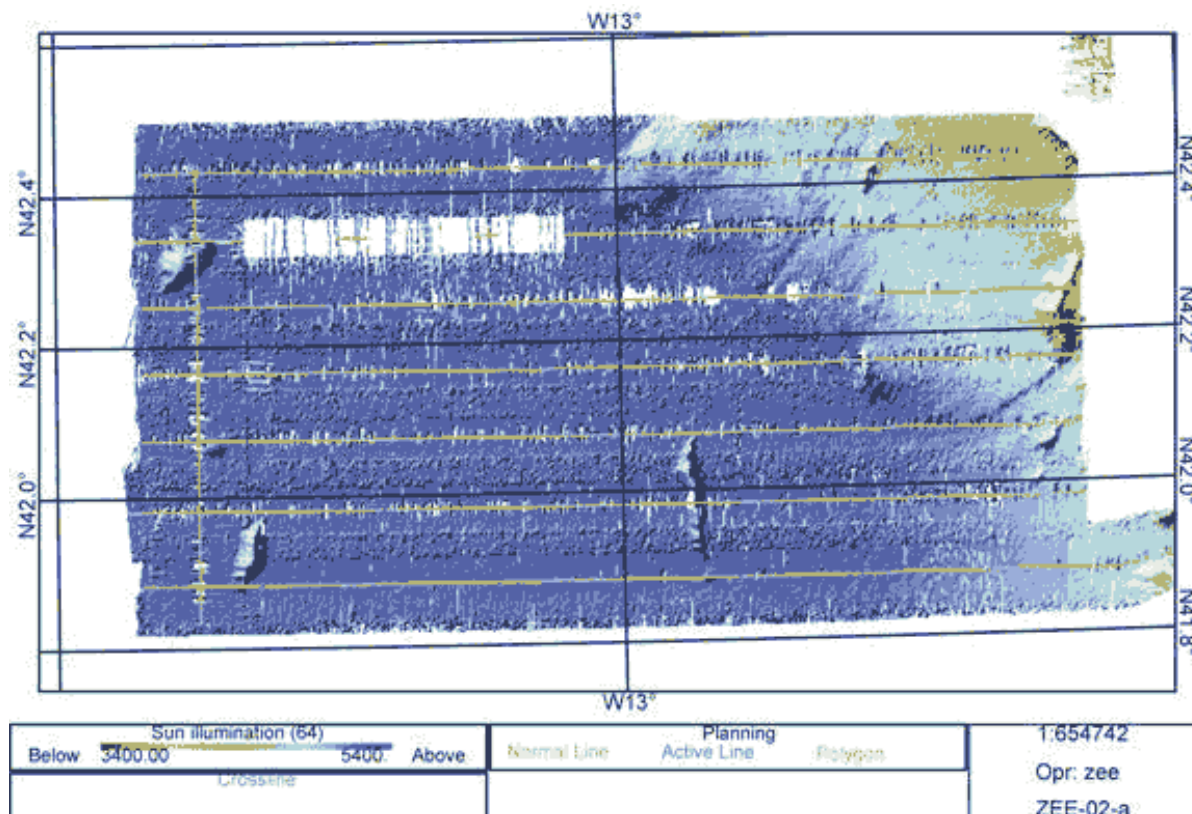
## 2 METODOLOGÍA DE TOMA DE DATOS: BATIMETRÍA Y POSICIONAMIENTO

La batimetría es la ciencia que mide las profundidades marinas para determinar la topografía del fondo del mar. Una carta batimétrica es un mapa que representa la forma del fondo de un cuerpo de agua, normalmente por medio de líneas llamadas isobatas, que unen puntos de igual profundidad.

En la elaboración de una cartografía submarina son tres los datos principales a medir en cada punto: profundidad, reflectividad, y posición.

Con la profundidad y posición de cada punto, se elabora el mapa de isobatas que determina una parte de la cartografía un fondo marino. Pero en la representación, se ha de facilitar también la composición y naturaleza del fondo (rocoso, arena, arrecife...). La reflectividad, aparte de servir como información adicional para elaborar el mapa de isobatas, puede ayudar a determinar la naturaleza del fondo. Comparando los valores obtenidos, con observaciones realizadas in situ con un ROV (*Remote Operated Vehicle*) puede determinarse qué tipo de reflectividad corresponde con unas determinadas características.

Una vez obtenidos los datos se pueden representar, en primera aproximación, para tener una idea general de cómo es el fondo que se ha cartografiado, e identificar posibles anomalías o defectos en la medición que puedan ser solventados en ese momento.



▲ Figura 20: Imagen preliminar obtenida con una sonda multihaz moderna.

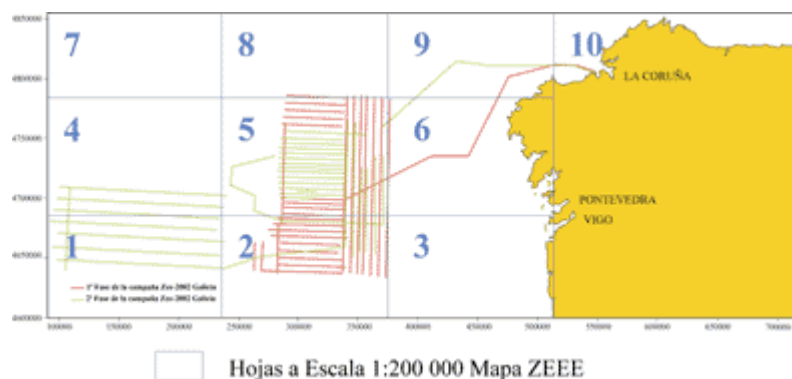


## 2.1 CONSIDERACIONES PREVIAS

Para la representación cartográfica de una zona concreta, hay varios aspectos a considerar previos a la toma de datos.

En primer lugar, una vez conocida la zona a cartografiar, hay que llevar a cabo una división de la misma en zonas si la extensión de la misma así lo requiere. Esta división puede atender a diversos factores. Para zonas muy extensas, como puede ser la cartografía de todo el territorio de un estado, puede interesar la referenciación por meridianos y paralelos. Pero para zonas más concretas, se suele dividir el estudio en aquellas zonas en que podamos emplear el mismo tipo de sonda, jornadas de trabajo, distancia al puerto más cercano, etc. En cualquier caso, se trata de optimizar costes y plazos.

Esta labor de proyecto es de gran importancia pues, a la hora de trabajar en el mar, una correcta planificación puede suponer una disminución de costes importantes. Así, es de gran importancia conocer estudios previos que se hayan podido realizar en la zona, cartografía ya existente, o conocer las características geomorfológicas de la zona, aunque sea sólo en primera aproximación. De este modo, se podrá elegir el método óptimo para reconocer la zona, y evitar tener que repetir medidas por una incorrecta elección del dispositivo. Ello implicaría tener que desplazarse de nuevo al punto concreto y repetir las mediciones, implementarlas en la base de datos, y reprocesarlos, con el consecuente coste y un aumento en el tiempo de ejecución de la cartografía.



▲ Figura 21: División del área de estudio para la zona de Galicia, dentro del proyecto de cartografía de la Zona Económica Exclusiva Española.

Dependiendo de los requerimientos del proyecto, se necesitará un mayor o menor detalle para la cartografía. Así, por ejemplo, para un gasoducto puede ser conveniente una cartografía a escala 1:2500, mientras que para otros estudios (de transportes, por ejemplo) no es necesario tanto detalle, siendo aceptables escalas de 1:100.000 a 1:350.000.

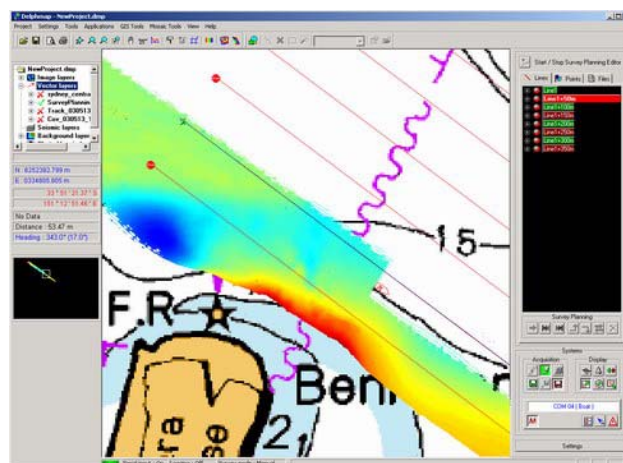
De la escala va a depender que empleemos un método u otro de medición. Existen diversos tipos de sonda, como veremos a continuación, cuyo óptimo se obtiene para un rango determinado de profundidad, reflectividad del fondo, velocidad de desplazamiento de la sonda y ancho del área de barrido. Así, emplearemos una u otra según las necesidades del proyecto en concreto. No obstante,

existen aparatos muy versátiles que permiten trabajar con un rango de valores para esos parámetros muy amplio, lo que los hace polivalentes a la hora de caracterizar fondos muy irregulares, o en el caso muy común de que no existan datos previos de la zona a cartografiar.

La siguiente tabla muestra, en líneas generales, los métodos más apropiados para las distintas escalas y resoluciones.

Medio	Rango	Resolución
satélites, altimetría	escala global	2500 m
sonda multihaz, medidor sísmico multicanal	regional (1000 Km)	100 m
side scan sonar, medidor sísmico de alta resolución, deep-tow	local (10-100 Km)	10 m
medidor sísmico de muy alta resolución, deep-tow, sumergible	local (1-10 Km)	1 m
ROV, sonda de experimentación "in situ", monitorización	estación (<1Km)	0,01 m

No obstante, es conveniente identificar las necesidades de cada estudio en concreto y, en algunos casos, pueden necesitarse mediciones posteriores con otros equipos que permitan caracterizar una zona con otro procedimiento distinto.



▲ Figura 22: Software de navegación para la toma de datos sistemática con sonda

Una vez elegido el procedimiento de sondeo, se pasa a establecer un plan de navegación, que puede llevarse a cabo manualmente estableciendo los rumbos necesarios para barrer la zona completa de la que se está haciendo la cartografía, considerando el ancho de la banda de exploración que nos proporcionará la sonda, y las posibles necesidades de solape de esta banda, como veremos más adelante.

Existen programas informáticos que vinculan automáticamente el posicionamiento, y la medición de mareas y profundidades, brindando además información en pantalla para seguimiento de derrotas programadas. Esto facilita las labores de navegación, y permite una mayor precisión.

En resumen, el resultado será una lista de datos en la que, para cada punto, tendremos su posición respecto de un origen, su profundidad, y la respuesta obtenida por la sonda, lo que permitirá obtener el mapa batimétrico de la zona y caracterizar su superficie.



## 2.2 EQUIPAMIENTOS ACÚSTICOS.

Existen distintos dispositivos acústicos, en función de la zona a cartografiar:

- Sondaz monohaz
- Sondaz multihaz
- Sondaz laterales o Side Scan Sonar
- Sondaz TOPAS

En general, estos dispositivos (salvo la sonda TOPAS, como se verá más adelante) pueden ir o bien montados en el casco del barco, o en cascos independientes conectados al barco mediante cable coaxial o fibra óptica, y arrastrados por éste. Puede apreciarse en las siguientes imágenes.



▲ Figura 23: Sonda multihaz montada sobre el casco del buque *Le Suroît*, de la flota de *IFREMER*.



▲ Figura 24: Sonda lateral en dispositivo *deep-tow*, para ser arrastrado. El peso es de unas 2 toneladas, y puede requerir hasta 9 Km de cable coaxial.

### Sondaz monohaz (*single beam echosounder [SBES]*)

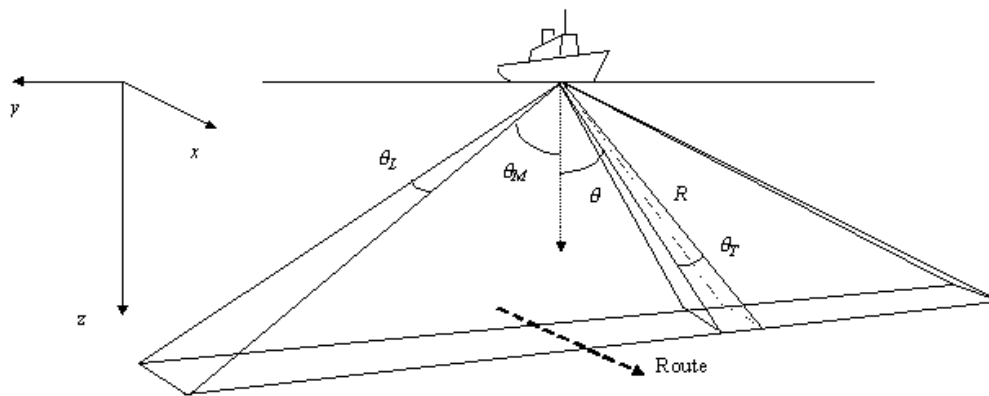
Las sondaz monohaz emiten un haz de una frecuencia, típicamente 200 kHz. Fueron las primeras en desarrollarse y actualmente están en desuso en el campo de la cartografía submarina. No obstante, para otras aplicaciones (como navegación, pesca...) pueden ser de utilidad, dada su simplicidad y facilidad de manejo, para profundidades de hasta 1000 metros.

### Sondaz multihaz (*multibeam echosounder [MBES]*)

Las sondaz multihaz son de gran aplicación en el campo de la cartografía submarina. Emiten varios haces de una determinada frecuencia en varias direcciones, con lo que el barrido de muestreo y la cantidad de datos para cada punto es mucho mayor. Así, se pueden eliminar las medidas atípicas y corregir los valores obtenidos, siendo mucho más precisas.

La siguiente tabla muestra los parámetros típicos para una sonda multihaz:

Frecuencia de muestreo	13 kHz
Profundidad de muestreo (z)	De 50 a 11000 m
Longitud de cobertura	de 5 a 7 veces la altura de agua
Apertura de haz ( $2 \cdot \theta_M$ )	150°
Número de haces	162
Resolución por píxel	2,4 m
Velocidad de adquisición	máximo 10 nudos
Frecuencia de adquisición	de 2 a 20 segundos
Escala de trabajo	1:100 000 – 1:500 000



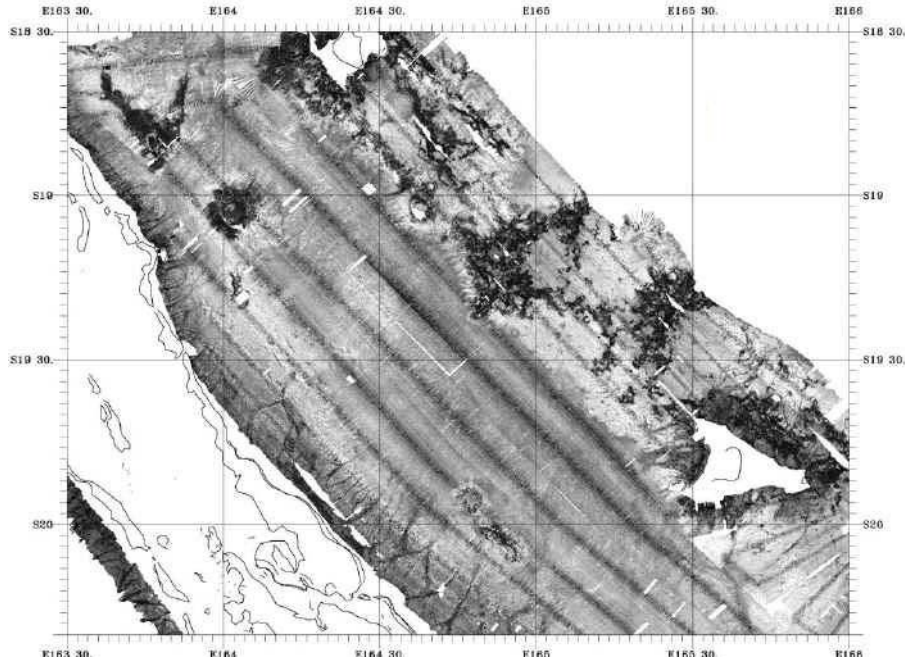
No obstante, existen distintas frecuencias de trabajo dependiendo de la profundidad:

Sonda	Rango de profundidad	Frecuencia	Tipo de trabajo
Grandes fondos	100-12000 m	10-15 kHz	Taludes, dorsales oceánicas y abisales
Fondos medios	30-3000 m	30-50 kHz	Taludes, plataformas
Pequeños fondos	5-500 m	80-120 kHz	Plataformas continentales
Aguas someras	0-100 m	200 a 400 kHz	Zonas litorales

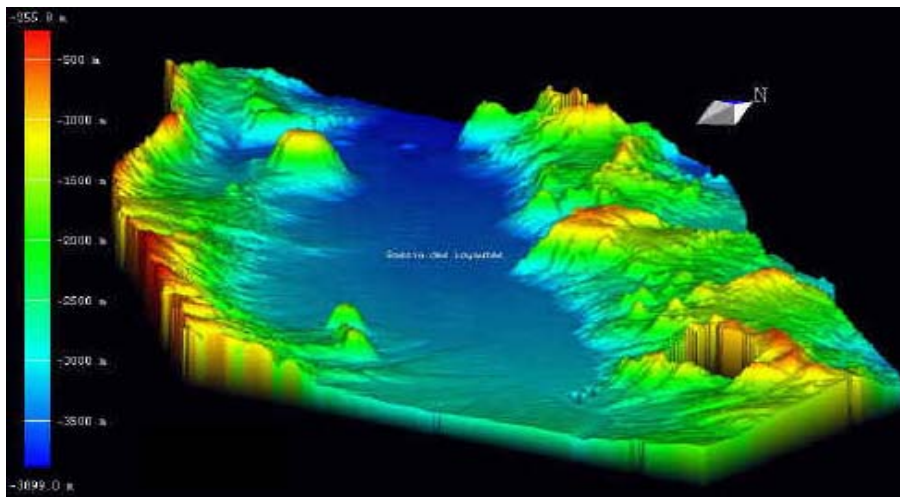
La intensidad de la señal reflejada en la vertical es muy elevada (señal especular). En los laterales, la señal se va atenuando en función de la distancia. Con el fin de estabilizar la señal obtenida, se puede tratar ésta como se verá más adelante. A la vez que se realiza esta estabilización, la amplitud de la señal recibida se almacena también como dato de la reflectividad, que es intrínseca a la naturaleza del fondo marino. Así, se pueden caracterizar relacionando la reflectividad de un área a las observaciones in situ mediante ROVs o exploraciones con submarinistas en ese área.

La posición de la sonda es medida por GPS diferencial (DGPS), obteniendo precisiones de una decena de centímetros, y de 0,05° para los ángulos. Otro dato a medir es el movimiento vertical del barco (de la sonda). Puede emplearse un mareógrafo, que determine los valores corrigiendo las medidas, o los datos obtenidos por el DGPS, que tiene una precisión similar. Pero existen otros factores que también pueden influir en las medidas, y que en caso de ser necesarios pueden medirse para efectuar las pertinentes correcciones, como son la salinidad del agua, su temperatura, la

cantidad de partículas en suspensión, etc. La precisión de la medida de la sonda varía con el ángulo. En las zonas más alejadas, la precisión es menor, llegando incluso a haber 1-1,5 metros de error. Esto puede paliarse solapando las zonas de medida y obteniendo valores medios.



▲ Figura 25: Imagen obtenida con sonda multihaz (EM12 DUAL de L'Atlante, Ifremer)

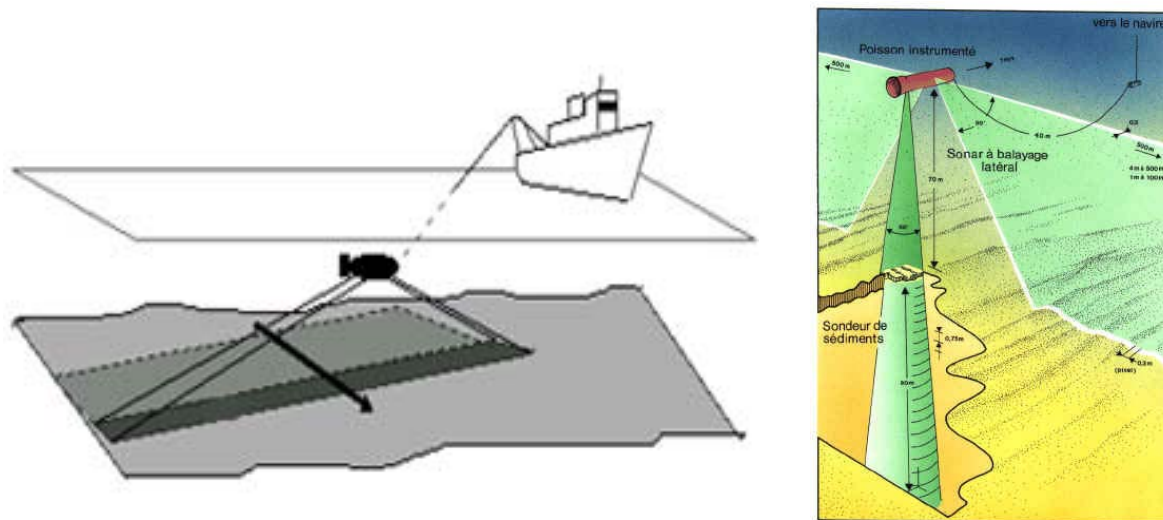


▲ Figura 26: Modelo digital del terreno obtenido a partir de la información anterior.

### Sonda lateral (*Side Scan Sonar [SSS]*)

Las sondas laterales son, quizás, los dispositivos más versátiles para la realización de batimetrías en un amplio rango de profundidades y resoluciones. La mayoría de las sondas laterales van montadas en dispositivos sumergibles que son arrastrados por un barco, evitando en gran medida la problemática asociada al movimiento de la nave. Este tipo de dispositivos sumergibles se

denomina **deep tow**. En muchos casos, a la vez que la sonda lateral, incorpora numerosos sensores para medir las propiedades del agua, y la naturaleza geológica del terreno. El principio de funcionamiento es muy sencillo: la sonda emite lateralmente ecos en una banda de anchura constante, que se va desplazando con el avance del barco. La emisión de este eco caracteriza las irregularidades del terreno permitiendo crear una batimetría de gran precisión, y escalas de hasta 1:10 000 – 1:5 000. Pero además, permite el almacenamiento de información acerca de la reflectividad del fondo, para su posterior caracterización.

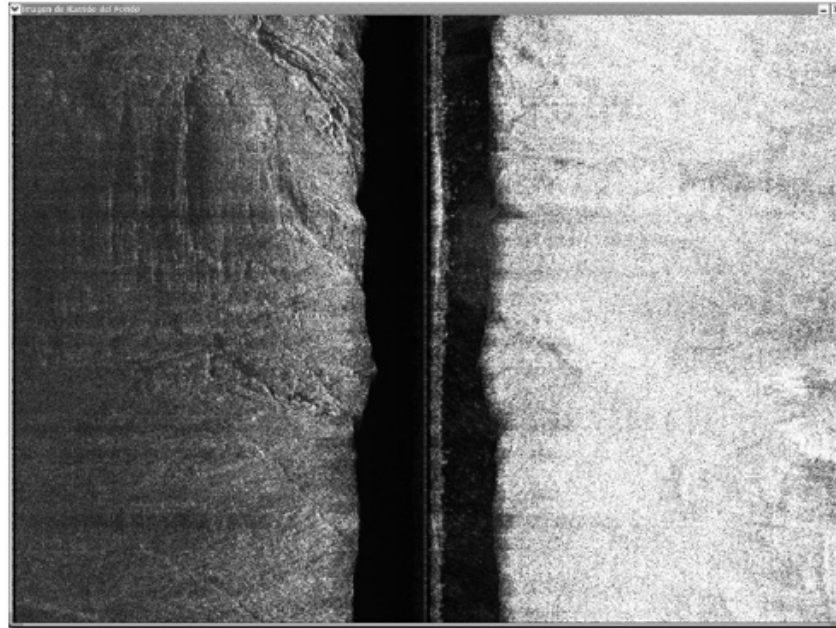


▲ Figura 27: Esquema de funcionamiento de una sonda lateral en dispositivo *deep-tow*.

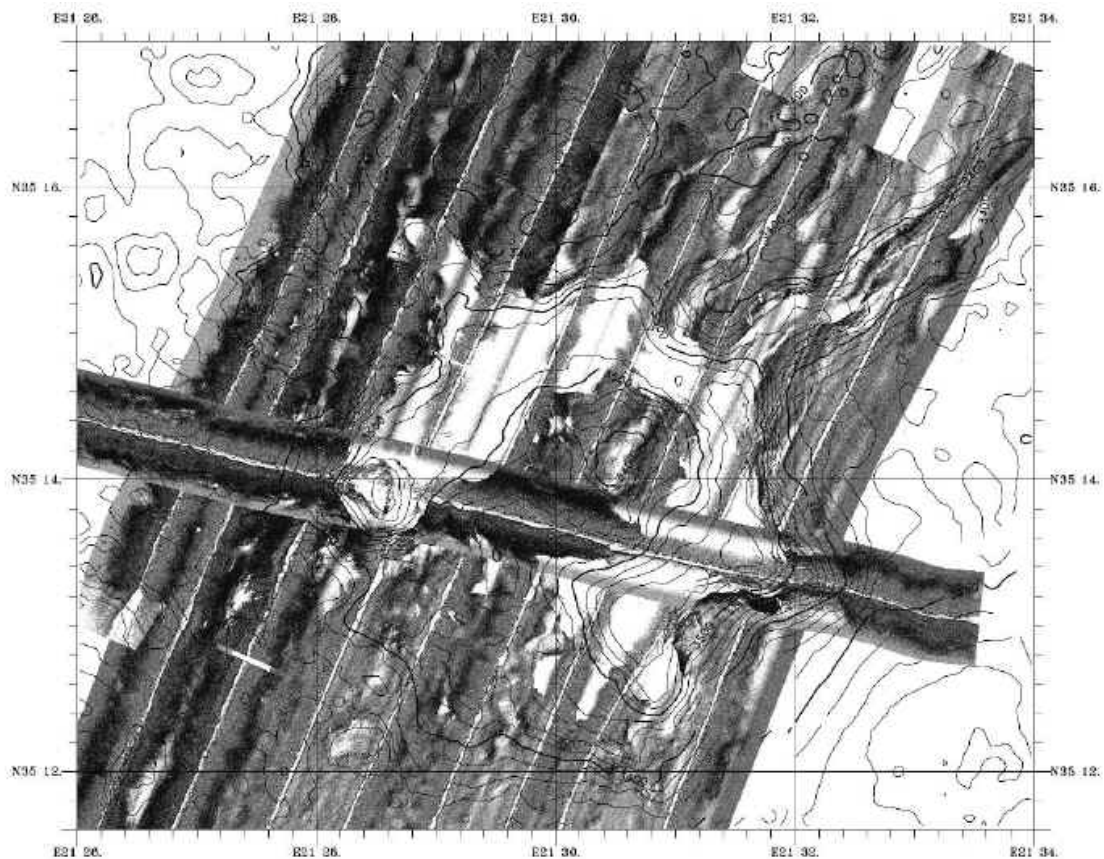
La siguiente tabla muestra los parámetros característicos de una sonda lateral:

Frecuencia de muestreo	170-190 kHz
Profundidad de muestreo	de 200 a 6000 m
Longitud de cobertura	2 x 750 m
Apertura de haz	2 x 80°
Resolución por píxel	0,3 m
Velocidad de adquisición	max. 2 nudos
Frecuencia de adquisición	1,5 segundos
Escala de trabajo	1:10 000 – 1:50 000

El avance de la banda acústica permite tomar varias medidas para un mismo punto. El dato final para ese punto será superposición de distintas medidas, lo que mejora la precisión del método. La forma en que funciona la sonda merece un análisis detallado. El eco propiamente dicho no se produce hasta que la señal emitida por la sonda no choca contra el fondo. La recepción de este eco no se produce en una sola vez. Se recibe una primera señal muy intensa, que no sirve para determinar la orografía, pero sí para estimar la posición de la sonda respecto del fondo, en su vertical. Pero la resolución horizontal de esta señal es muy pobre, por lo que para ello se utilizan los ecos siguientes.



▲ Figura 28: Imagen en tiempo real obtenida por interpretación de la señal de una sonda lateral

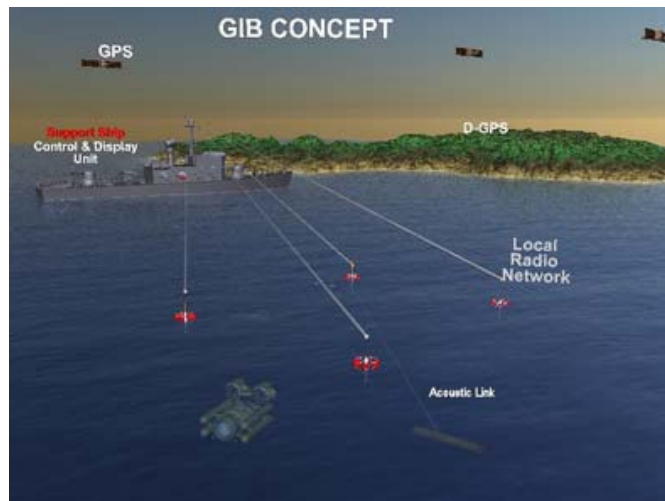


▲ Figura 29: Imagen de sonda lateral de un área de 190 Km<sup>2</sup>; la zona blanca en forma de cabeza de caballo es un lago de salmuera submarino, que se caracteriza por tener muy baja reflectividad.



Uno de los problemas que presenta la sonda lateral es la aparición de sombras tras determinadas formaciones. El análisis preliminar de los datos obtenidos y las primeras imágenes proporcionadas por la sonda pueden ayudar a determinar si es necesaria una nueva medida en la zona de sombra, o si existen suficientes datos como para extrapolar las mediciones próximas. Pero esta aparición de sombras es de utilidad en otras aplicaciones, como es la localización de pecios, minas, etc. en el fondo.

Uno de los parámetros más importantes a controlar es la posición relativa de la sonda respecto del barco. La posición del barco se determina generalmente por GPS diferencial (DGPS), pero la posición de la sonda respecto de éste puede variar en función de las corrientes, la velocidad, el oleaje... La frecuencia de emisión de la red GPS (1,5 GHz) no permite que estas ondas se propaguen bajo el agua, por lo que no es posible el posicionamiento mediante un GPS instalado en la sonda. Por ello, ha de contar con un sistema de posicionamiento relativo respecto del barco. Además, en caso de necesitar una precisión mayor, pueden situarse algunas boyas posicionadas por DGPS y comunicadas entre sí y con el dispositivo sumergido, de manera que la referencia sea múltiple respecto de varios puntos y la precisión mayor. Es lo que se denomina Sistema GIB (GPS Intelligent Buoy).



▲ Figura 30: Posicionamiento relativo de un dispositivo sumergido respecto del barco.

## Sonda TOPAS

TOPAS es un perfilador del fondo marino indicado para aplicaciones donde sean necesarias una elevada penetración o alta resolución.

El sistema tiene los siguientes componentes: Fuente acústica, consola de operación, y unidades de almacenamiento masivo y periféricos.

El sistema tiene capacidad de procesado en tiempo real y puede presentar los datos brutos y los procesados en pantalla, en impresora térmica y en una impresora de color. Los parámetros de procesado pueden cambiarse en cualquier momento para mejorar en tiempo real la calidad de los datos adquiridos.

El sistema tiene dos modos básicos de operación:

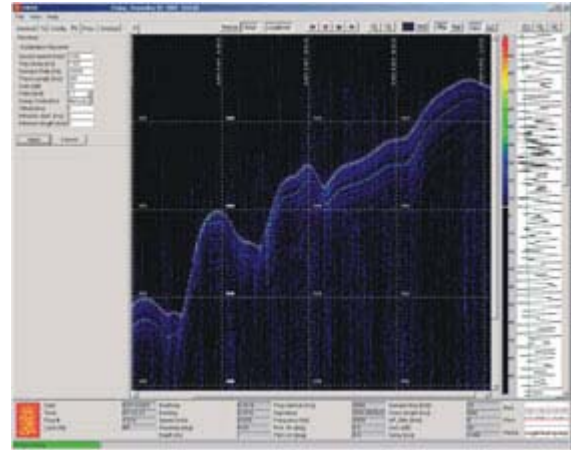
- Alta resolución. Este modo es típico para investigación de rutas de cable y de tuberías, donde se necesita información detallada de la superficie, y de los sedimentos en los 10 primeros metros. Da buenos resultados entre 2000 y 4000 m a más profundidad la relación señal / ruido no es

óptima. Se configura con pulsos individuales cortos (*ricker pulses*), ya que tienen un buen comportamiento, son de fase lineal y tienen un ancho de banda relativamente amplio.

- Alta penetración. Cuando se trabaja en aguas profundas o se necesita mucha penetración, es necesario transmitir más energía, se utilizan barridos lineales de frecuencia (*chirp*).

El perfilador de fondos TOPAS está diseñado alrededor de una antena paramétrica, utilizando las características no lineales de propagación del medio (agua) que permiten la generación de señales de baja frecuencia utilizando un pulso de muy corta duración (*burst*) de una señal de alta frecuencia, o a partir de la intermodulación de dos señales de alta frecuencia.

Esta técnica permite la generación de un haz acústico muy estrecho de baja frecuencia a partir de un sensor relativamente pequeño; de esta forma se eliminan algunos inconvenientes clásicos en la generación de señales acústicas de baja frecuencia (lóbulos laterales, *ringing*). También permite la estabilización electrónica de los haces, tanto en balanceo como en cabeceo.



▲ Figura 31: Vista preliminar y en primera aproximación de una sonda TOPAS

La señal recibida (eco) es amplificada, digitalizada, procesada y mostrada en tiempo real. Los principales pasos del procesado son: filtrado pasabanda, deconvolución (señales FM - *chirp*), *stacking*, TVG (*Time Variable Gain*), control automático de ganancia (AVC) y filtrado de oleaje y cálculo de atributos.

### 2.3 POSICIONAMIENTO POR GPS DIFERENCIAL (DGPS)

Como ya se ha indicado anteriormente, el posicionamiento en la toma de datos se lleva a cabo mediante GPS diferencial cuando se requieren precisiones elevadas.

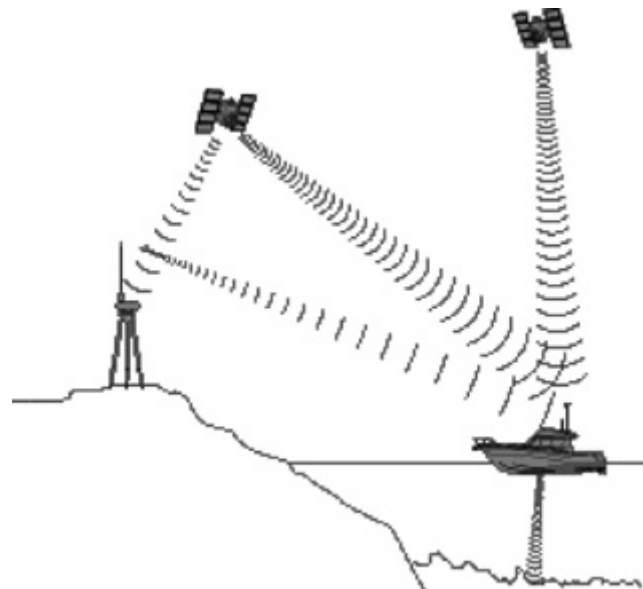
Para el posicionamiento global por GPS, veinticuatro satélites orbitan a 11.000 millas (unos 18.000 Km) sobre la Tierra y transmiten información de su posición orbital y de tiempo. Los receptores GPS situados en Tierra interpretan las señales de al menos 3 satélites para calcular la posición actual mediante triangulación. La triangulación requiere del uso de lecturas de tiempo, localización y órbita de cada satélite para matemáticamente determinar la posición relativa. Se usa un cuarto satélite para correcciones de tiempo entre el receptor GPS y el reloj del satélite.

Sin embargo, aunque la información transmitida por los satélites sea extremadamente precisa, la posición calculada por el receptor no representa la posición real. De hecho, el error puede alcanzar más de 100 metros y la medida de velocidades se puede ver afectada por una desviación de 3 mph. Las fuentes de error son las siguientes:

- *Selective Availability (SA)*: El Departamento de Defensa de los EE.UU. (DoD) degrada intencionadamente la señal GPS alterando la marca de tiempos o la información de la órbita de los satélites, de forma que la triangulación es totalmente imprecisa. El DoD intenta evitar de esta forma que países enemigos usen la tecnología americana en tiempos de guerra.
- La señal del satélite puede rebotar contra *partículas de la ionosfera* y la troposfera creando de esta manera un retraso. Ya que el receptor compara la marca de tiempos suministrada por el satélite y la señal que ha medido, cualquier retraso deriva en un error de triangulación.
- El *multicamino*, provocado por rebotes de la señal en edificios, montañas u otros objetos, produce un incremento en el tiempo que tarda en llegar la señal al receptor.

En Cartografía, una desviación de 100 metros respecto a la posición real es un error pocas veces asumible. Si se utilizan datos de GPS no diferencial para realizar mapas, éstos no podrían ser reproducibles de forma consecutiva por la aleatoriedad de los errores de posición. Para conseguir los órdenes de magnitud anteriormente expresados es necesario añadir complejidad al sistema y elevar los costes económicos respecto a un sistema sencillo como GPS.

La solución adoptada es el **DGPS** (*Differential Global Positioning System*). El concepto clave es que dos receptores cercanos se verán afectados de igual forma por los retrasos en la señal causados por la atmósfera o por la SA. Supongamos uno de los dos receptores fijo (estación base), cuyas coordenadas son conocidas exactamente. De esta manera, ya que la posición del satélite es conocida, se podrá calcular la distancia de la estación base al satélite (*range* - distancia). En funcionamiento normal, la distancia calculada por la estación base debido a las señales que le llegan del satélite estará afectada de errores (*pseudorange* - pseudodistancia). La diferencia entre *range* y *pseudorange* es el error y se conoce como **corrección diferencial**.



▲ Figura 32: Posicionamiento por DGPS

Existen dos formas básicas de aplicar las correcciones diferenciales: *post-processed DGPS* y *real-time DGPS*. Con el post-procesamiento los datos en bruto son recogidos en un archivo de datos. Éste se vuelca a un software junto con los datos obtenidos por la estación base. El resultado reduce los errores de la SA y otros errores corregible. El post-procesamiento permite mejores precisiones que el DGPS de tiempo real. El incremento de precisión se debe a la reducción de la latencia, inherente al DGPS de tiempo real, y a la potencia de los algoritmos de post-procesamiento. El *real-time DGPS* consiste en el uso de un radio enlace entre la estación base (en tierra o en el mar) y el barco. La corrección es aplicada a los datos que recibe el barco en tiempo real. Para el DGPS de tiempo real se necesita un equipo que reciba las correcciones enviadas desde una fuente DGPS.



## 2.4 BATIMETRÍA DESDE SATÉLITE

Tradicionalmente, las batimetrías se han llevado a cabo desde barcos o en dispositivos sumergidos. La toma de imágenes queda relegada a zonas muy concretas y de características muy particulares, con lo que no es una buena opción en la mayoría de las veces.

La realización de cartografías submarinas tiene una problemática asociada muy extensa, como queda de manifiesto en este documento. Es debida, en su mayor parte, a las particulares condiciones de trabajo sobre grandes masas de agua, y las distintas propiedades de ésta. Sin embargo, las técnicas **gravimétricas** y **magnetométricas** aplicadas en la cartografía desde satélite, no se ven afectadas por esa problemática.

A escala global, los únicos mapas submarinos terrestres se han realizado desde satélite pues, como ya se ha indicado, las navegaciones cartográficas no cubren con totalidad los fondos marinos.

En las últimas dos décadas, se han empleado para cartografía desde satélite las mediciones del Geosat, cuyos datos recabados durante 18 meses de exploración se desclasificaron en Julio de 1995. Estos datos han permitido crear mapas submarinos globales, cuyo casi único objetivo es mostrar la orografía general de los fondos marinos y despertar la curiosidad científica.

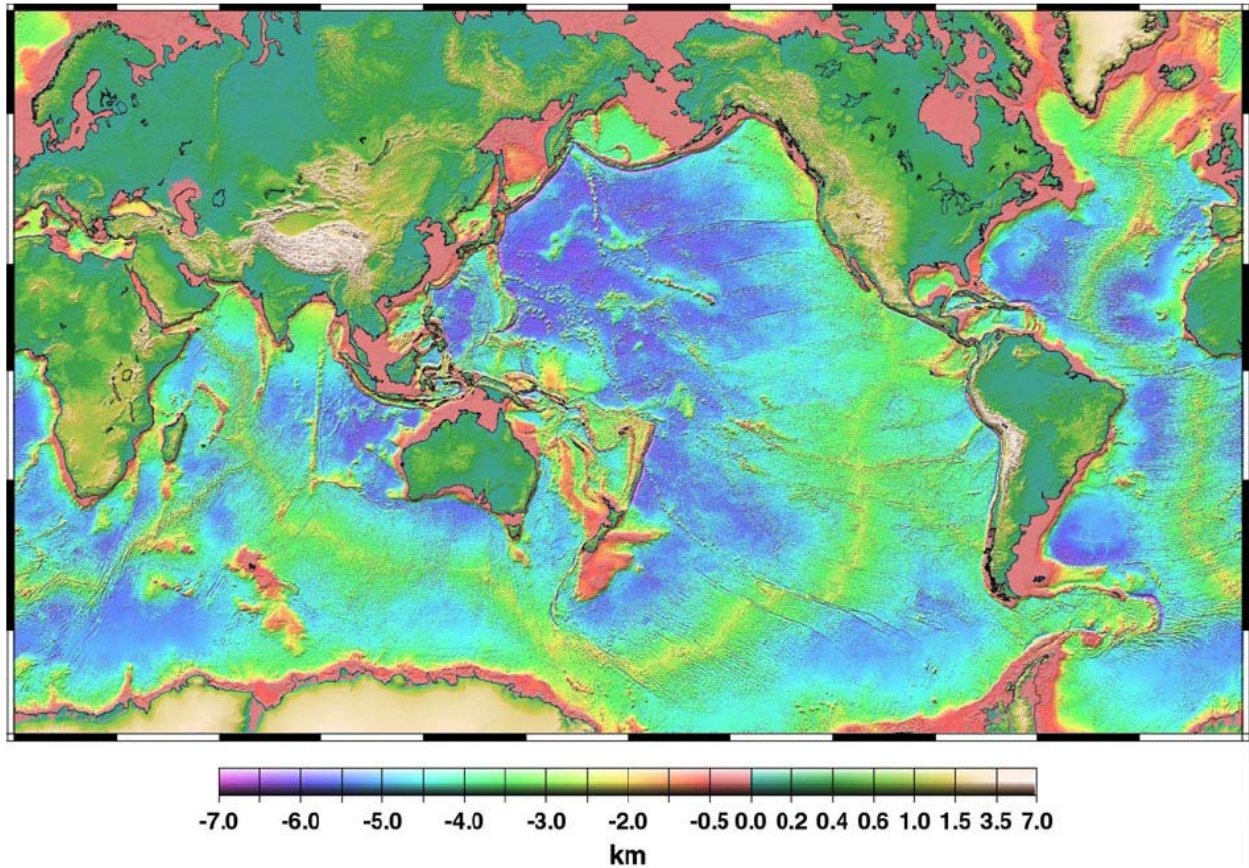
En la actualidad, el único método para cartografiar áreas con una resolución inferior a 200 m es la navegación cartográfica con sondas. Sin embargo, para resoluciones más moderadas —tolerables para áreas de 15-25 Km, aunque de escasa aplicación en ingeniería— la altimetría desde satélite es una alternativa mucho más económica y rápida, y los resultados son aceptables.

Los satélites Geosat y ERS-1 han explorado los fondos marinos del planeta, y analizado el campo gravitatorio. Estos datos, se han combinado y procesado para formar un geoide marino [Cazenave *et al.*, 1996; Sandwell and Smith, 1997; Tapley and Kim, 2001]. En las escalas que estamos tratando, las variaciones en la anomalía gravitatoria están muy relacionadas con la topografía submarina. En la actualidad, el trabajo pasa por combinar los datos obtenidos en las navegaciones con los obtenidos por satélite para formar una más completa cartografía submarina. Además, los datos obtenidos mediante navegación pueden emplearse para calibrar las mediciones, relacionando las variaciones locales en la topografía con los ratios de gravedad asociados a las variaciones tectónicas y por sedimentación.

En la actualidad, existen proyectos para realizar nuevas mediciones de lo que se conoce como **High Spatial Resolution Satellite Altimetry** (altimetría por satélite de alta resolución espacial). La aplicación de los avances tecnológicos permitiría una mayor resolución, con lo que el campo de aplicación de este tipo de cartografías sería mucho más extenso:

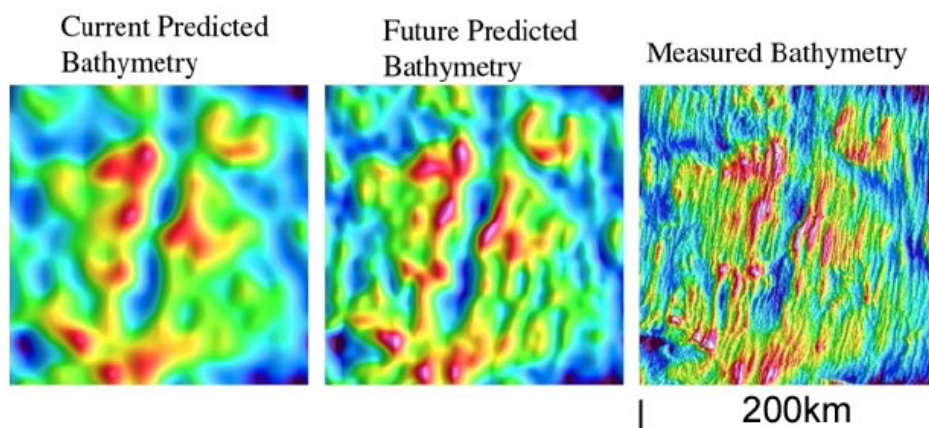
- planificación de rutas de cable
- modelos de tsunamis
- modelos hidrodinámicos de mareas, predicción de erosiones, etc.

- mejora de los modelos mareales costeros.
- legislación y distribuciones estatales
- defensa



▲ Figura 33: Mapamundi de los fondos submarinos, obtenido por satélite.

La siguiente imagen (figura 34) muestra las diferencias entre las batimetrías obtenidas con navegación y sonda (derecha), datos actuales de satélite (izquierda) y previsión de mediciones por satélite futuras (centro)



▲ Figura 34: Diferencias entre las batimetrías obtenidas con navegación y sonda (derecha), datos actuales de satélite (izquierda) y previsión de mediciones por satélite futuras (centro)

Los principales factores que afectan en las medidas batimétricas realizadas desde satélite, y que han de ser eliminados, son:

- mareas (puede ser corregido empleando modelos matemáticos o medidas de las mareas)
- movimientos tectónicos (que habrán de determinarse)
- interferencias producidas por la sequedad o humedad atmosféricas (que pueden ser corregidas midiendo dichos parámetros)
- variaciones barométricas (ídem)
- interferencias en la ionosfera (corregidas con altímetros de frecuencia dual, o modelos matemáticos)
- sesgo electromagnético (corregido o calibrado con la curva de la respuesta del radar)

En resumen, la cartografía desde satélite es un campo aún por desarrollar, con posibles aplicaciones y notables beneficios frente a los métodos tradicionales de cartografía submarina.

### 3 HERRAMIENTAS, PROCESADO DE DATOS Y MÉTODOS

Los nuevos sistemas de cartografía han sufrido recientemente una revolución; los algoritmos de proceso de imágenes tales como los de mejora del contraste son un ejemplo. Pero el proceso de datos es algo más que el proceso de la imagen. Existen numerosas anomalías en las características reflectivas del fondo marino, por lo que el problema real es encontrar un método de caracterización del fondo, una vez subdividida la imagen en zonas de similares propiedades. Una de las áreas de desarrollo más activo en la cartografía y caracterización del fondo marino es la clasificación de áreas a partir de datos obtenidos por sensores remotos. Los dispositivos actuales de batimetría exploración permiten obtener simultáneamente datos de batimetría y reflectividad. Además, permiten ser calibrados en función de las características de reflectividad de la zona, eliminando *ruido* en la información, y simplificando el procesado de los datos. Los geólogos "enseñan" al software a distinguir las diferentes zonas para localizadas en el mapa, de manera que los datos obtenidos sean lo más fiables posible. Un ejemplo de este caso es el uso de sondas multihaz de baja frecuencia. Debido a la existencia de "efecto volumen" (*volumic effect*) el modelado geoaústico incluye numerosos parámetros que han de fijarse para cada caso concreto. Así, tiene que existir retroalimentación entre los estudios de campo y los datos acústicos obtenidos para esa misma zona. Este "entrenamiento" de la sonda es una importante limitación de este proceso, aunque se tiende a extrapolar resultados similares para zonas similares.

En algunos casos, puede ser de interés hacer medidas in situ si los valores obtenidos por la batimetría son confusos. Como se dijo anteriormente, el avance tecnológico en los ROVs permite tomar imágenes y muestras, en muchos casos simultáneamente a la realización de la batimetría.

#### 3.1 PROCESADO DE DATOS POR CARACTERIZACIÓN DEL FONDO: SEGMENTACIÓN.

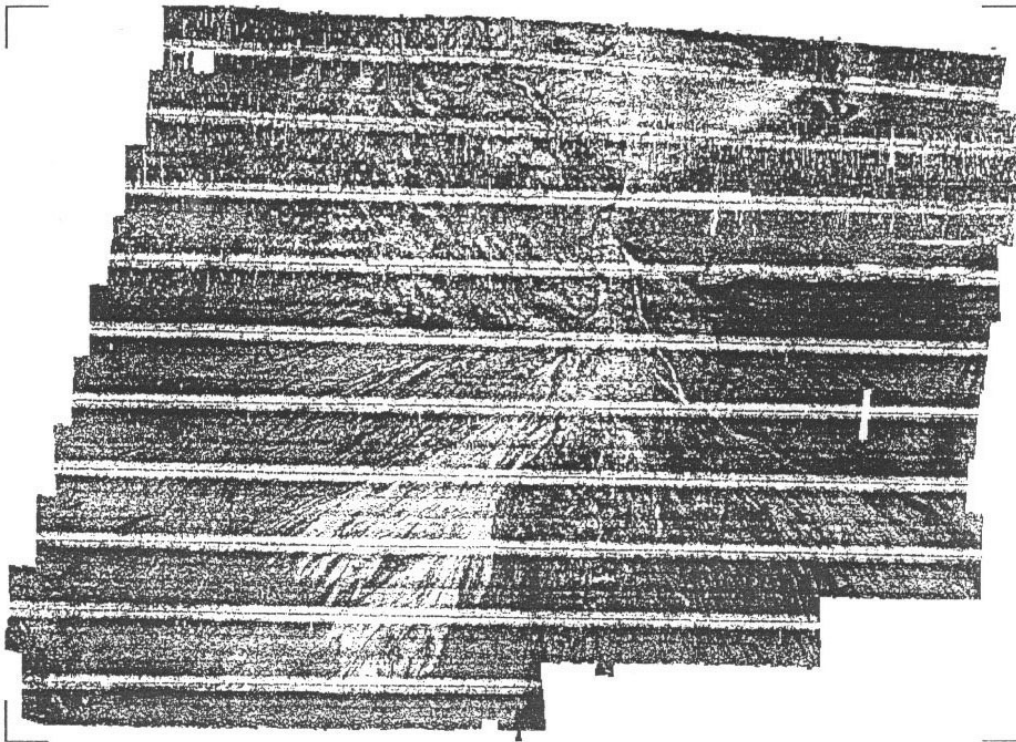
El empleo de la sonda inapropiada o menos óptima para cartografiar una zona determinada puede hacer necesario un tratamiento previo de la información de manera que el software de proceso de datos pueda tratarlos adecuadamente.

Como se ha explicado anteriormente, la segmentación de la toma de datos en zonas homogéneas, ayuda mucho en el tratamiento posterior de los datos. Una vez segmentadas, la imagen acústica obtenida es más fácilmente legible, apreciándose conexiones entre zonas y transiciones suaves. Además, esto hace posible detectar imperfecciones debidas a fallos en el aparato y no a la metodología de toma de datos. Es muy importante en la toma de datos referenciar correctamente las posiciones de medida, de manera que el tratamiento posterior de las imágenes sea el correcto. En este sentido, y si es posible, se pueden balizar las zonas a rastrear para reconocerlas posteriormente, o bien posicionarlas vía GPS.

En la caracterización del fondo marino hay dos consideraciones previas a cualquier estudio: estimación cuantitativa de los parámetros objetivos, y comparación directa con el medio. La primera ayuda a la elección del medio más adecuado para la toma de datos, y la segunda puede confirmar esta información. En cualquier caso, es conveniente apoyarse en la información que pueda facilitar un

geólogo, o en los estudios que hayan podido desarrollarse previamente.

A modo de ejemplo, la siguiente imagen tomada con una sonda de baja frecuencia (13 kHz) muestra la aparición de bandas afectadas por efectos físicos (reflexión especular insuficientemente compensada) y patologías debidas a la sonda (líneas de dirección preferentes según el movimiento de la sonda)

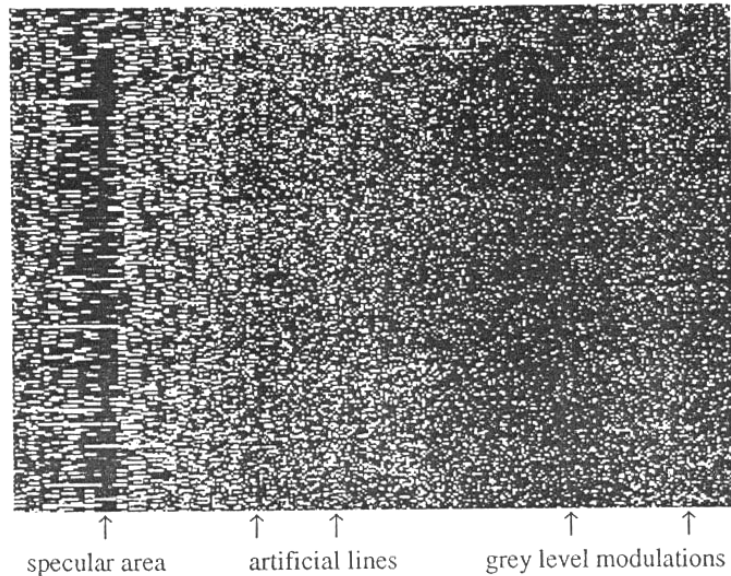


▲ Figura 35: Imagen tomada con una sonda de baja frecuencia (13 kHz) que muestra la aparición de bandas afectadas por efectos físicos y errores debidos a la sonda.

Las patologías debidas al movimiento de avance de la sonda pueden solventarse comparándolas con imágenes parciales obtenidas con la sonda de manera estática. La corrección de los datos para su posterior procesado informático ayuda a minimizar este efecto, de cara a representar el fondo marino con mayor exactitud.

En el caso contrario, se muestra una imagen obtenida con una sonda de alta frecuencia (95 kHz) en aguas superficiales.



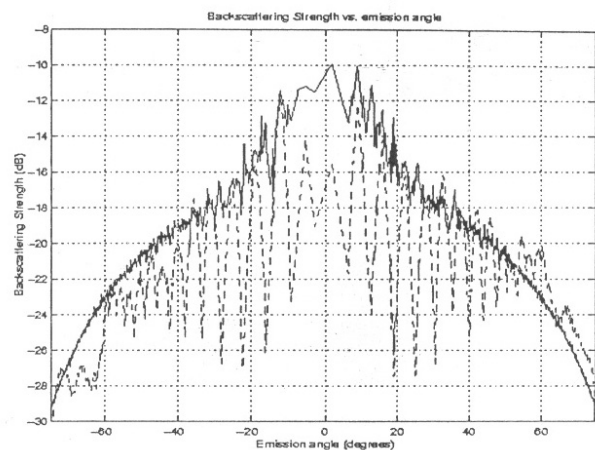


▲ Figura 36: Imagen obtenida con una sonda de alta frecuencia (95 kHz) en aguas superficiales.

En primer lugar, aparecen modulaciones en distintos niveles de gris (en la imagen, *grey level modulations*) debidas a ganancias electrónicas por acoplamiento en emisión y recepción. En segundo lugar, aparecen fuertes fluctuaciones de amplitud en las zonas en que el ángulo de incidencia tiende a cero (centro de la imagen), creando líneas artificiales (en la imagen, *artificial lines*). Finalmente, la baja respuesta en las zonas más alejadas hace que aparezcan reflejos especulares (en la imagen, *specular area*).

Basándose en estos últimos resultados, una manera de entrenar a la sonda para una determinada zona es elegir un área (o, preferiblemente, varias) plana y comparar la imagen obtenida con una de referencia. Otra zona a corregir es la situada alrededor de la vertical al lugar de toma de datos, en la que aparecen problemas en la reflectividad. Se puede efectuar una corrección de los datos, tal y como muestra la imagen. La línea de trazos representa el nivel de respuesta frente al ángulo de emisión antes de la corrección, y la línea continua después.

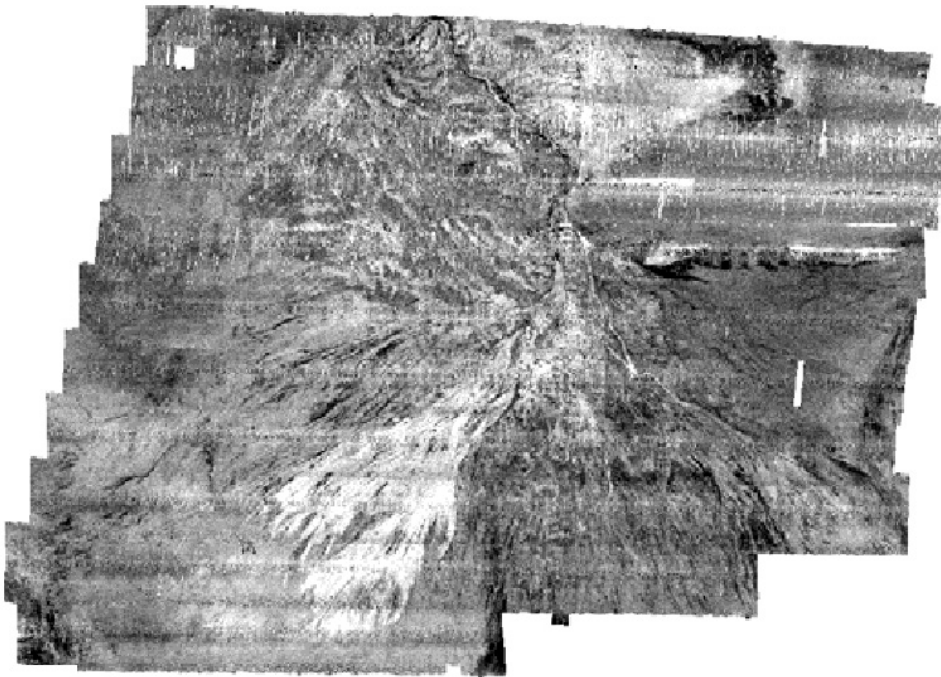
Las oscilaciones de nivel con el ángulo han desaparecido prácticamente en las incidencias más oblicuas, y se han suavizado en la zona más vertical. Además, la imagen ha ganado en simetría y más próxima a la respuesta teórica esperada.



▲ Figura 37: Corrección de la respuesta de una sonda multihaz (respuesta frente a ángulo de emisión). La línea de trazos muestra la respuesta original, y la continua la corregida.

Además, la imagen ha ganado en simetría y más próxima a la respuesta teórica esperada.

La aplicación de esta corrección a la primera imagen da como resultado la siguiente:



▲ Figura 38: Imagen corregida aplicando el algoritmo de segmentación

Como puede observarse, se han minimizado los efectos direccionales debidos al movimiento de la sonda, y a los problemas de reflexión.

### 3.2 ELIMINACIÓN DE DATOS RECURRENTES PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO

A pesar de los modernos y potentes equipos informáticos para el procesado de datos, la necesidad de grandes resoluciones en ciertas aplicaciones ha llevado a la utilización de nuevas sondas de hasta 250 haces que pueden capturar hasta 35 millones de datos para cada coordenada (X, Y, Z) por hora. Aparte de representar un problema de almacenamiento en el caso de dispositivos portátiles o sumergibles, el procesado de estos datos se vuelve una tarea lenta y, en algunos casos, tediosa. Además, en muchas ocasiones estos datos tienen que ser corregidos en cuanto a posición, cota, etc. por los errores cometidos durante la medición. El tratamiento informático de tal cantidad de datos ralentiza el proceso. Existen numerosas aplicaciones en las que se requiere una respuesta en tiempo real, por lo que la eliminación de datos recurrentes para la creación de cartografía o modelos digitales del terreno es crucial.

Existe variedad de software informático para el tratamiento y representación de datos para cartografía submarina, proporcionado por los distintos fabricantes y específicos para cada sonda. Además, las distintas organizaciones que trabajan en este campo desarrollan o han desarrollado software específico para sus intereses, en muchos casos dirigido al tratamiento y corrección

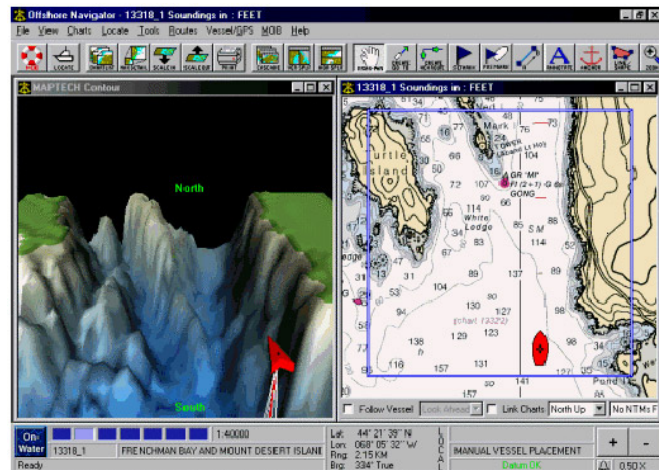
simultáneos de los datos. La tendencia actual es a ajustar la relación calidad / cantidad de información para los requerimientos de cada caso concreto. En algunos casos, se está desarrollando software que permite el almacenamiento total de los datos, con un tratamiento de parte de ellos para las salidas en tiempo real. De esta manera, se pueden analizar posteriormente la totalidad de las medidas si se requiere mayor precisión, y se tiene la velocidad necesaria para la representación en tiempo real de la información tomada.

Los resultados aquí expuestos son una síntesis de los estudios de C. Canepa y O. Bergem publicados en *Third European marine science and technology conference. Session Report. Seafloor characterisation* bajo el título *Automatic outliers elimination and optimal mapping: a solution*.

Cuando se crea una cartografía, la función  $f$  que representa el terreno se calcula tradicionalmente en una malla uniforme, y se interpola entre los nodos de la malla. El cálculo del valor de la profundidad para un nodo se calcula como media o media ponderada de los valores de los puntos próximos. Existen otros procedimientos que llevan más tiempo, pero son más fiables, consistentes en aproximar los datos entre nodos a una forma cuadrática. El problema viene cuando el número de nodos es excesivo, introduciendo gran cantidad de ruido y ralentizando el procesado de los datos.

Para optimizar el proceso, es importante eliminar los datos erróneos y los valores recurrentes. Esta eliminación puede llevarse a cabo durante la fase de toma de datos, bien por métodos gráficos o bien por métodos analíticos. Hasta el momento, la mayoría de los paquetes informáticos empleaban un método híbrido de aproximación y detección de los datos atípicos. De esta manera, se eliminan un máximo del 1% de los datos. Con datos de 1996, la adquisición de 1.000.000 de datos a la hora en una jornada de trabajo (8 horas) implicaba 4 horas de procesado de los datos y 8 horas más de trabajo para producir una cartografía fiable. Actualmente, las nuevas sondas multihaz multiplican estos valores, por lo que los procesos que se seguían entonces no son aceptables ahora. Además, los métodos que se empleaban no son robustos frente a errores, por lo que estadísticamente son poco aceptables. Por otra parte, en la actualidad se emplean superposiciones en las medidas, se solapan las bandas de exploración para tener una mayor fiabilidad, lo que implica que para un mismo punto se pueden tener distintos valores. En algunos casos, estas medidas pueden diferir por los errores ya mencionados, y los antiguos programas de eliminación de errores, simplemente no consideraban estos datos.

En la actualidad, se emplean algoritmos compuestos por varios pasos, en los que cada paso realiza una eliminación distinta, pero que en conjunto considera todos los datos. La novedad principal



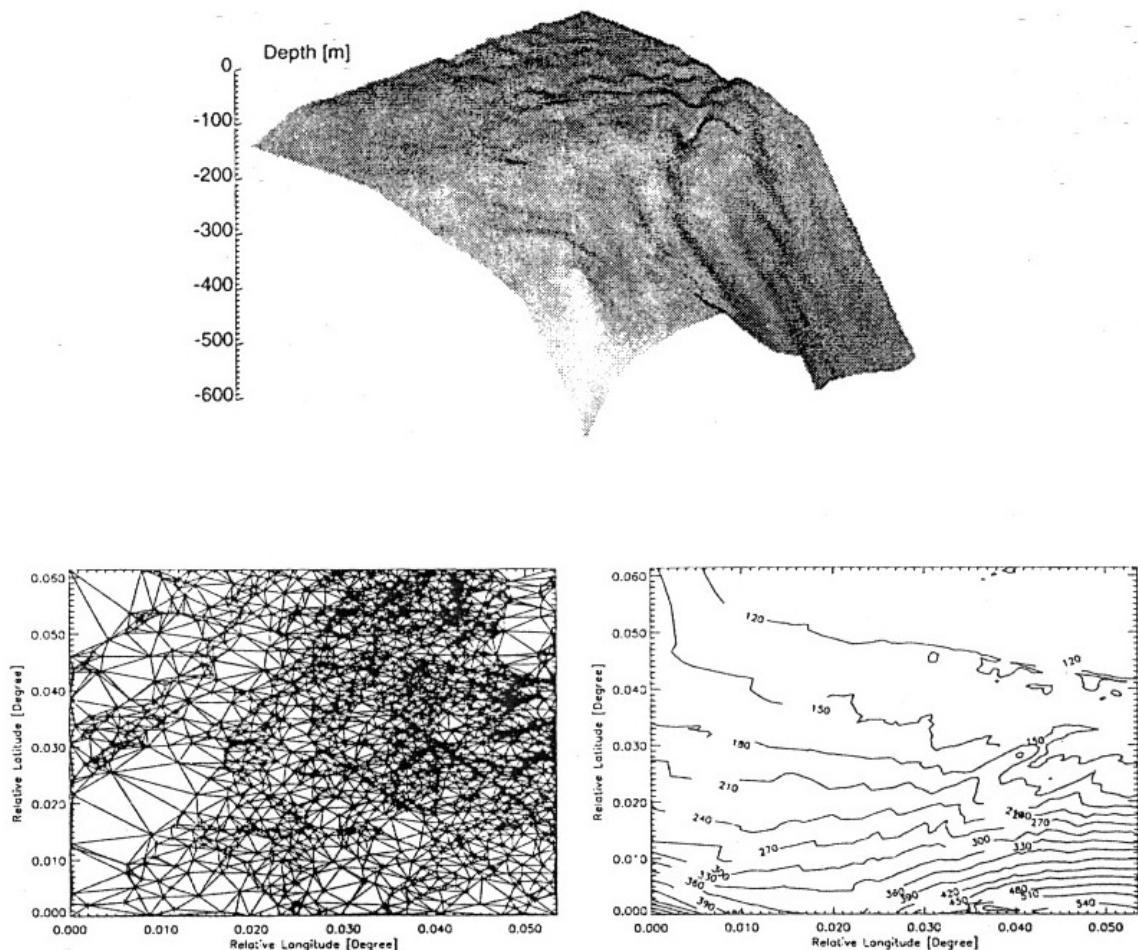
▲ Figura 39: Software de navegación que incluye cartografía y representación en tiempo real del fondo a partir de la base de datos.



es que estos pasos sencillos son rápidos de llevar a cabo, por lo que en conjunto la tarea es compatible con aspectos prácticos. Así se emplean todos los puntos próximos para la eliminación de los posibles errores, y optimiza el espacio de almacenamiento de estos datos eliminando las recurrencias.

Se emplean mallas trianguladas, que minimizan el número de nodos necesarios para describir un terreno, y minimizan la pérdida de información. El algoritmo determina los nodos entre los puntos más representativos de la malla, considerando la variación de cota de los mismos con relación a un parámetro previamente establecido que dará la resolución del mapa. Un valor menor de este parámetro proporciona mayor resolución, y un mayor número de nodos. Establecidos los nodos, se ajustan los demás valores intermedios a formas cuadráticas, obteniendo así el modelo final: las curvas isobatas y el modelo digital del terreno.

La Figura 40 muestra la aplicación de este algoritmo a la batimetría de un terreno. Los nodos considerados (2835) representan el 3,9% del total de los puntos medidos (13585).



▲ Figura 40: Aplicación del algoritmo a un terreno.

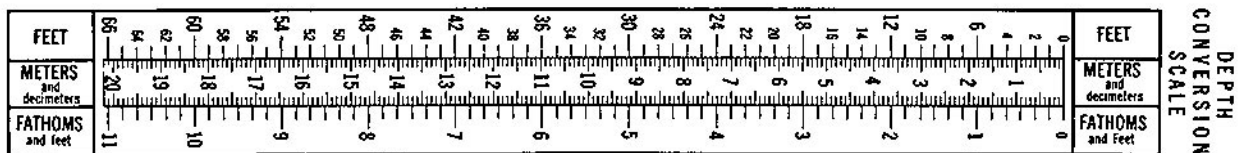
#### 4 REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA DEL FONDO MARINO

En líneas generales, la representación del fondo marino puede ser: bidimensional (cartografía 2D, como planos, mapas, etc.) o tridimensional (modelos digitales del terreno).

##### Unidades de medida

Aunque está aceptado internacionalmente el sistema internacional de medidas, aún existen cartas en las que la profundidad se expresa en medidas náuticas. Además, en todos los planos cuyas unidades se encuentran en el sistema internacional, existe una escala gráfica que correlaciona metros, pies (*feet*) y brazas (*fathoms*), de manera que

	1 metro ( <i>meter</i> )	1 pie ( <i>foot</i> )	1 braza ( <i>fathom</i> )
metros ( <i>meters</i> )	1	0,3048	1,8288
pies ( <i>feet</i> )	3,2808	1	6
brazas ( <i>fathoms</i> )	0,5468	0,1667	1

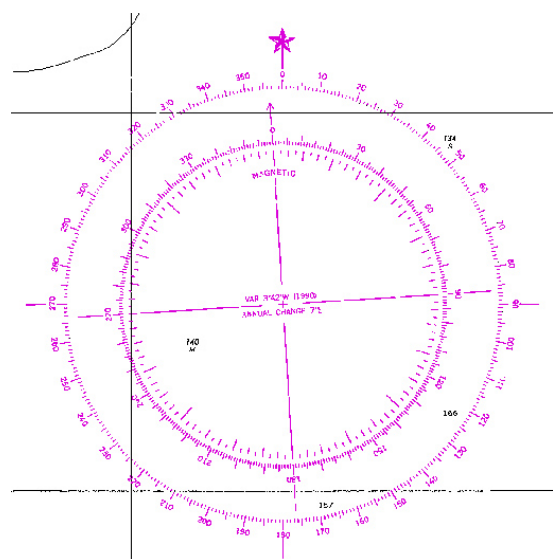


▲ Figura 41: Escala gráfica de conversión entre pies, brazas y metros

Para distancias, se emplean indistintamente los kilómetros y las millas náuticas, con la relación 1 milla náutica  $\leftrightarrow$  1,852 Km.

##### Rosa de los vientos

Aparece en todas las cartas de navegación, y contiene información de la situación del Norte Geográfico y Magnético, y demás rumbos respecto de éste, y la variación anual del Norte Magnético

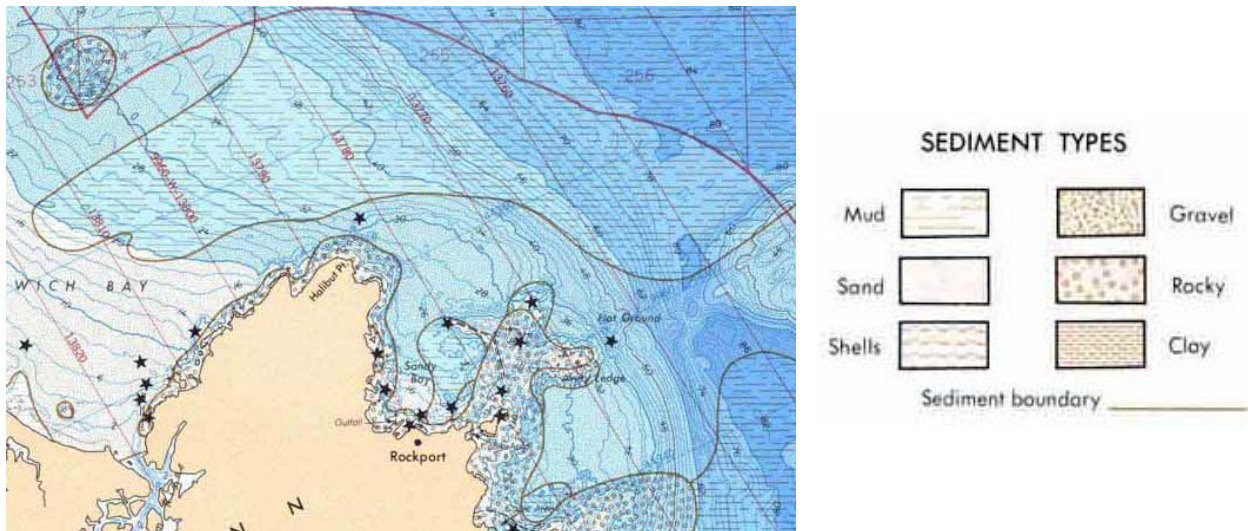


▲ Figura 42: Rosa de los vientos

### Caracterización del fondo marino

En muchas ocasiones, es útil conocer la naturaleza del fondo marino, por lo que muchas cartas incluyen esta información.

En algunos casos, se puede dar de forma gráfica (con un distinto relleno para cada tipo de fondo). Esto es más típico de cartas batimétricas para pesca, y no existe un estándar al respecto. Sin embargo, en el ámbito militar sí que se emplea una representación más o menos similar.



▲ Figura 43: Información sobre el fondo, mediante malla en una carta batimétrica para pesca (izquierda) su leyenda (derecha)

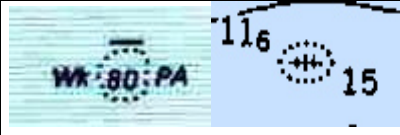
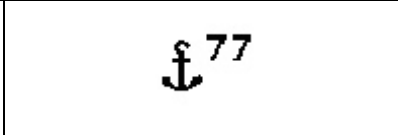
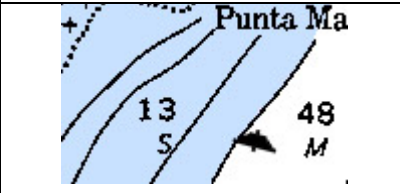
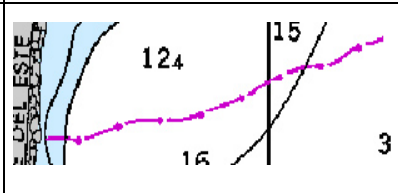
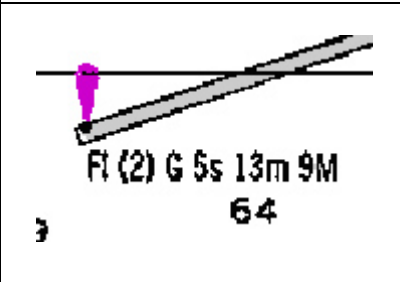
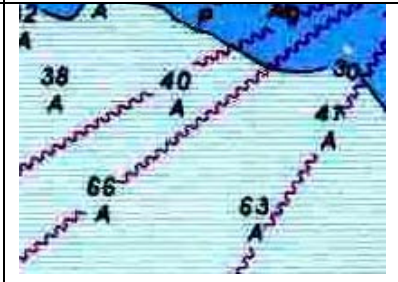
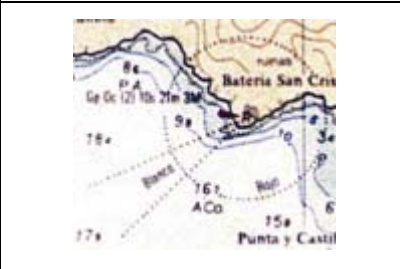
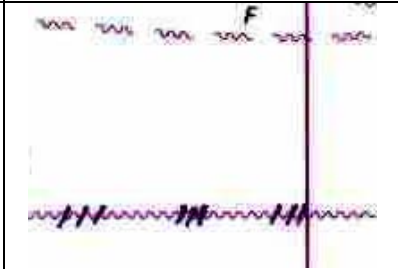
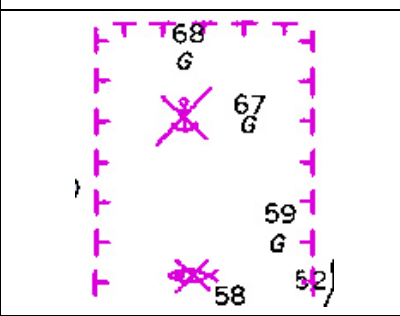
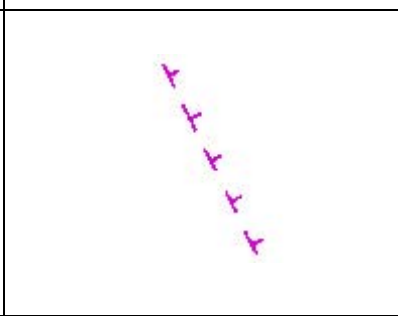

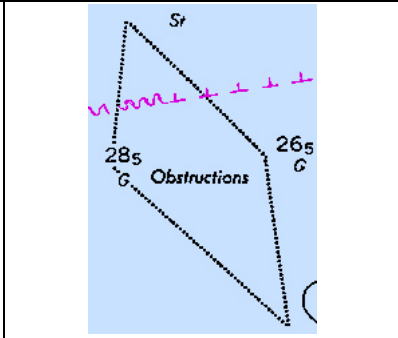
Sin embargo, en las cartas para navegación es más común que en las zonas de interés esta información aparezca reflejada bajo la cifra de cota, en forma de siglas. Estas siglas pueden ser en el idioma del país que hace la carta, o en el de la zona representada... o para mayor confusión, mezcla de ambos.





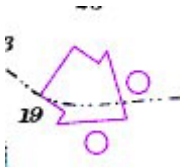

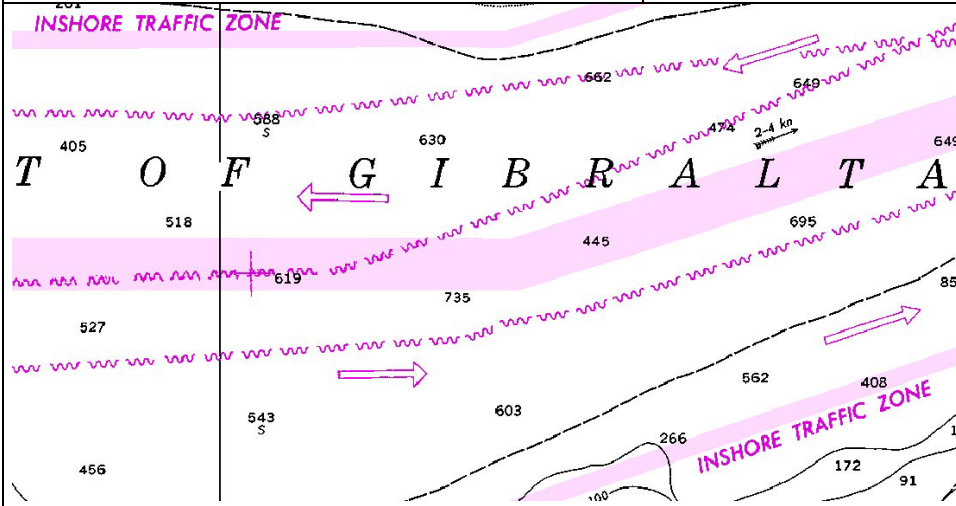
Definición	Siglas (inglés)	Siglas (castellano)
Fango	M ( <i>mud</i> )	F
Arena	S ( <i>sand</i> )	A
Grava	G ( <i>gravel</i> )	G
Piedras	R ( <i>rocks</i> )	P
Rocas (hasta 26cm)	Co ( <i>cobbles</i> )	Co
Pecio	Wk ( <i>wreck</i> )	Wk

▲ Figura 44: Siglas para la caracterización del fondo marino

Otros símbolos en las cartas batimétricas

Símbolo	Significado	Símbolo	Significado
	Pecio		Restos de pecio
	Lanby (Large Automatic Navigation Buoy)		Tubería submarina
	Faro o señal luminosa		Cable submarino (↗ cable eléctrico)
	Faro		Cable submarino sin uso o sin mantener.
	Zona de reserva: prohibida la pesca y el fondeo		Prohibido (la prohibición se especifica en la carta)
	Zona de navegación no permitida (en este caso, añade vertedero de explosivos (abandonado))		Obstrucciones (de cualquier naturaleza)

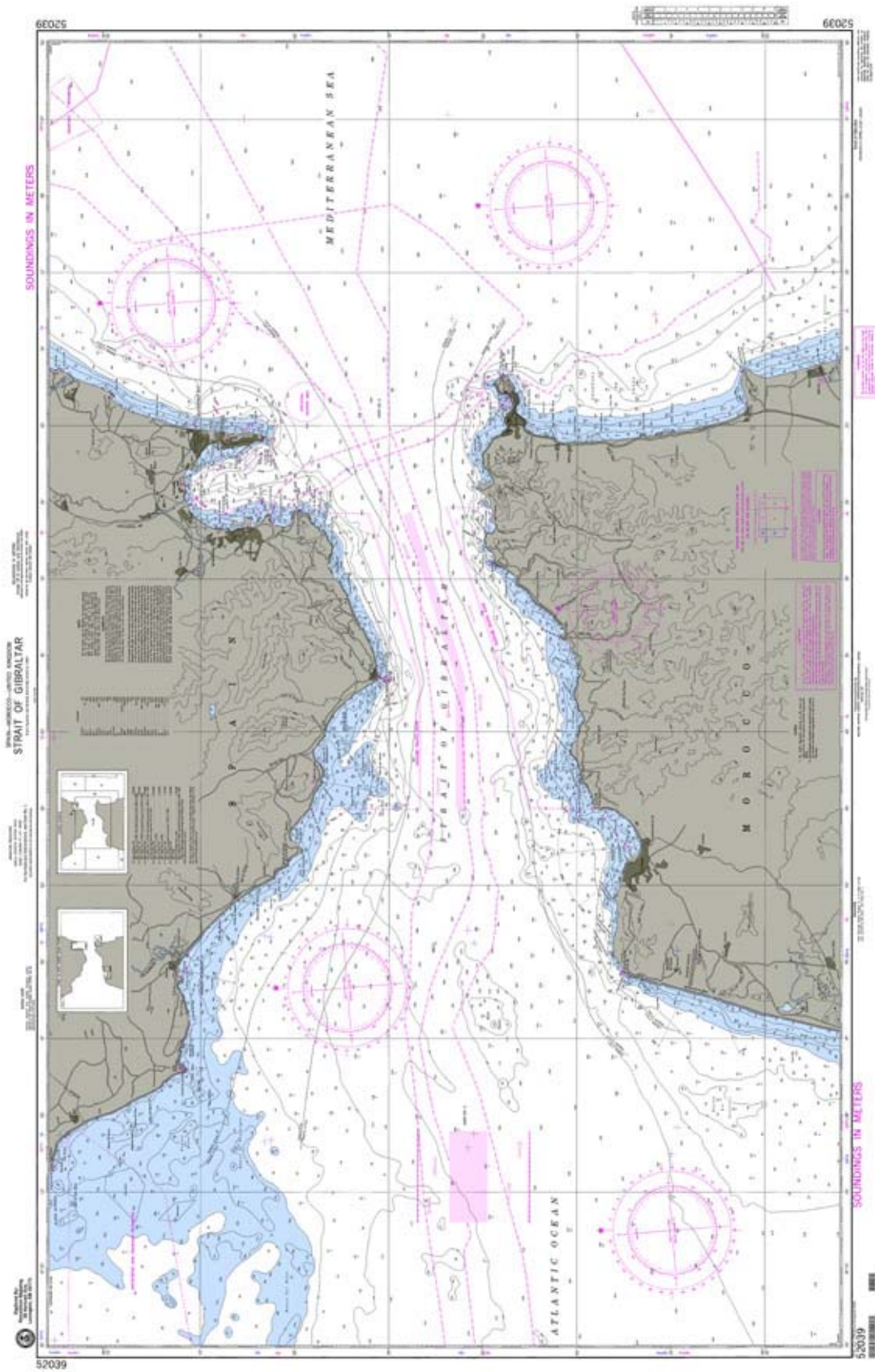


	<p>Arrecife natural</p>	 <p>Zonas de vivero, piscifactorías, etc.</p>
	<p>Dirección de navegación entre boyas (cuando ésta no es evidente)</p>	 <p>Boyas y otras señales fijas</p>
		<p>Control del tráfico de embarcaciones</p>

#### 4.1 CARTAS BATIMÉTRICAS PARA NAVEGACIÓN

Hoy en día, las cartas batimétricas para navegación pueden obtenerse en papel, o en formato digital para implementarlas en un software de navegación. Éstas han de ir calibradas y referenciadas, para la correcta interpretación de la imagen por parte del software.

A continuación, y a modo de ejemplo, se incluye una carta náutica del Estrecho de Gibraltar, en la que aparece gran cantidad de información de la que se explicó anteriormente (Figura 45).



▲ Figura 45: Carta batimétrica para navegación

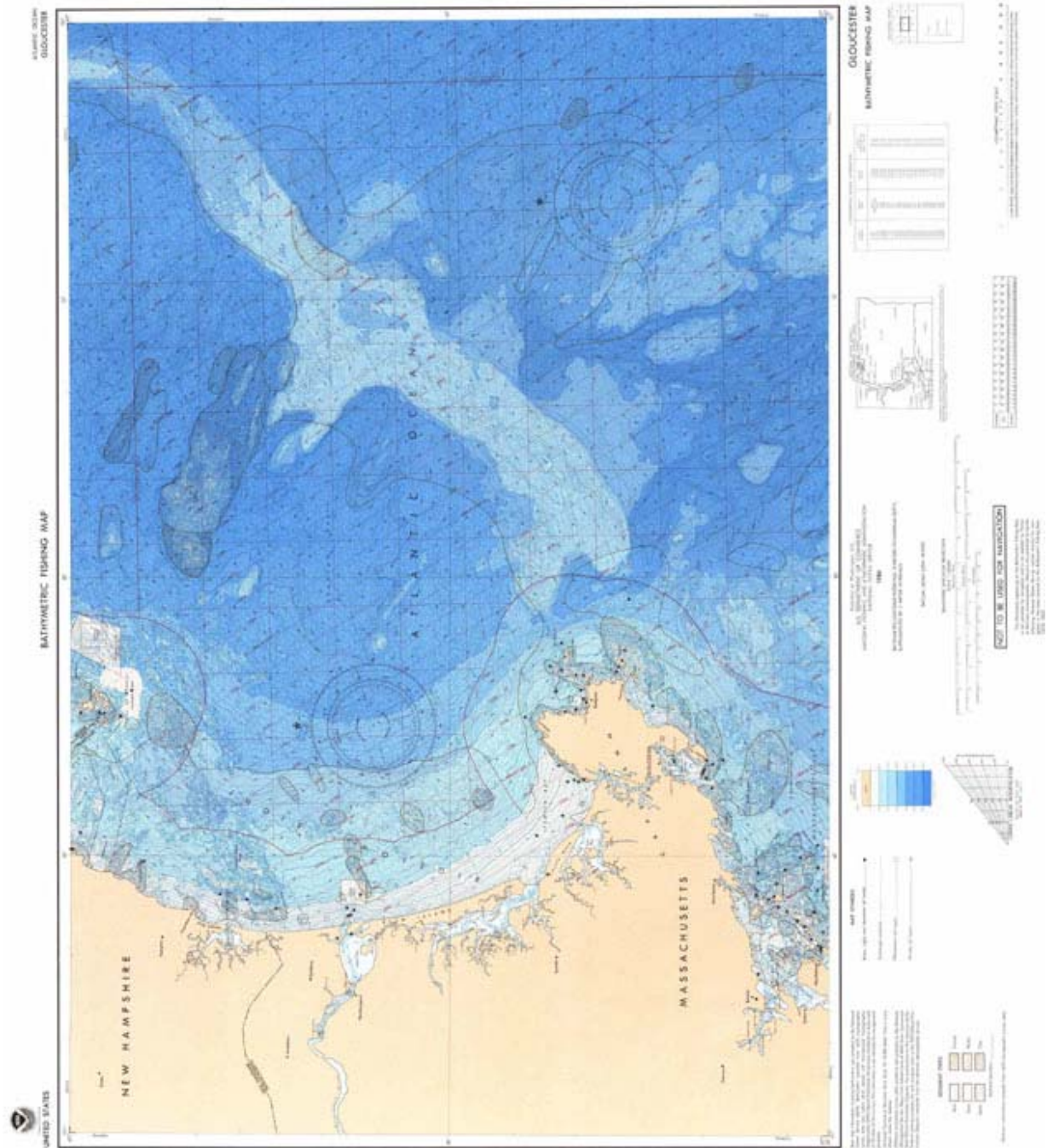


## **4.2 CARTAS BATIMÉTRICAS PARA PESCA**

Son cartas que representan la posición de los bancos de pesca conocidos, caracterizándolos por una trama o bien con la especie en cuestión sobre el área definida. En general, no deben ser empleados para navegación, pues los datos de las batimetrías no representan las zonas de peligro para las embarcaciones en todos los casos.

Es de gran interés la composición de los fondos para identificar las especies, así como las artes de pesca más adecuadas, por lo que también se especifican mediante una trama que se detalla en la leyenda. Son también de gran importancia las zonas económicas exclusivas de cada estado, por lo que se representan en la cartografía. Sin embargo, en muchos casos estas cartas incluyen otro tipo de información respecto a faros, rumbos de navegación, y otros datos más propios de cartas de navegación.

La siguiente página recoge una carta batimétrica para pesca (Figura 46).



▲ Figura 46: Carta batimétrica para pesca

## 5 APLICACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA SUBMARINA: LÍNEAS DE CABLE Y DUCTOS (GASODUCTOS, OLEODUCTOS Y POLIDUCTOS)

Uno de los principales casos en los que es de gran utilidad la cartografía submarina, es el tendido de líneas de cable (eléctrico, de comunicaciones, etc.) y la instalación de ductos (nombre con que se designa de manera general a los oleoductos, gasoductos y poliductos).

El tendido de cables submarinos empezó a desarrollarse a finales del siglo XIX. En 1847 se consiguieron máquinas para recubrir los hilos de cobre de gutapercha (un tipo de caucho o goma), lo que permitió que en 1852 se tendiera el primer cable submarino entre Inglaterra y Francia, a través del Canal de la Mancha. En 1859 se tendió el primer cable español entre Tarifa y Ceuta y en 1860 se enlaza Barcelona con Menorca e Ibiza. En 1861 se proyecta un cable con Cuba, pero tras muchas polémicas no llega a realizarse. En 1883 se enlaza a las Islas Canarias y, décadas después, en 1940, la red española cuenta con 46 cables submarinos con una extensión de 4.300 millas náuticas.

El gran objetivo era el tendido de un cable submarino entre Europa y América. El primer proyecto definitivo se aprobó en 1855: un cable trasatlántico entre Irlanda y Terranova. El tendido comenzó en Valentia (Irlanda) el 31 de julio de 1857. Pero hasta 1866 y gracias a la utilización del mayor buque a vapor disponible, el *Great Easter*, no se consigue completar el tendido.

Desde entonces hasta hoy, los avances tecnológicos han permitido instalar numerosos tendidos de líneas y ductos submarinos, para lo cual ha sido de gran utilidad el desarrollo de la cartografía submarina.

La complejidad de estas instalaciones depende mucho del tipo al que nos estemos refiriendo. Puede ir desde el simple tendido de cable, que se limita a ir *largando* cable y marcando en el plano batimétrico el recorrido aproximado de por dónde ha ido depositándose, hasta las grandes instalaciones de poliductos para grandes caudales, presiones y distancias, en cuyo caso hay que analizar con mucho detenimiento el terreno, realizar su explanación, controlar las pendientes, fijación al firme, etc.

### 5.1 TENDIDO DE CABLES

El tendido de cables para transmisión de datos, líneas telefónicas, etc. se ha visto sustituido paulatinamente por el uso de satélites de comunicaciones. No obstante, en algunos casos sigue siendo de interés y se siguen utilizando los cables ya instalados, y realizando nuevas instalaciones. Actualmente, el empleo de cables de fibra óptica abre nuevas posibilidades a las comunicaciones, por lo que se está generalizando su empleo y, con él, los cables de fibra óptica submarinos.

En el caso de los cables de transporte de energía, la instalación se sigue realizando en todo el mundo, por la escasez de recursos energéticos de algunos puntos, y por la mayor economía que supone transportar la energía que instalar plantas de producción en algunos puntos.

Quizás el principal inconveniente de los cables submarinos sea su mantenimiento y reparación. Pero el desarrollo de nuevas técnicas de posicionamiento y de la cartografía submarina, ayudan a hacer estas labores más sencillas, y disminuir en gran medida los plazos de reparación, facilitando la tarea de localizar el cable.

En la mayoría de los casos, los buques cableros (como se denominan a las embarcaciones que se emplean para este fin) únicamente largan el cable que se deposita sobre el fondo marino adaptándose a la orografía del terreno.



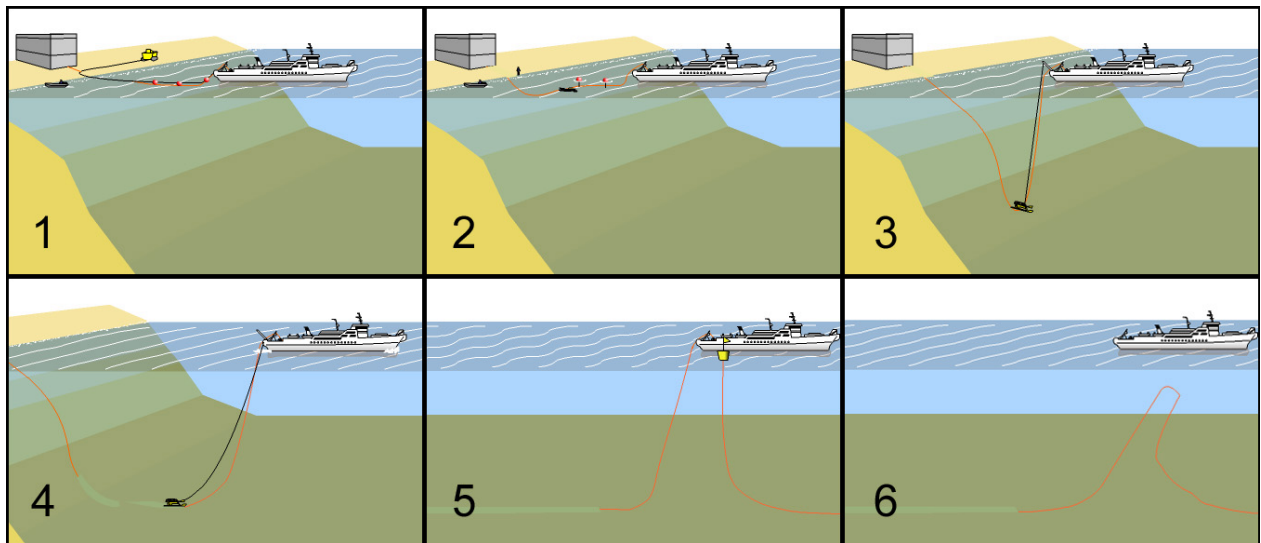
▲ Figura 47: Buque cablero Teneo, de bandera española, de la empresa *Tyco Telecommunications*.



▲ Figura 48: Trabajos de conexión de cable con tierra.

El tendido de cable submarino es un proceso bastante delicado, y es muy similar independientemente del tipo de cable del que se trate. Sólo hay que considerar las características particulares de cada cable, en cuanto a propiedades mecánicas, a la hora de proyectar su tendido. Se resume en la siguiente secuencia:

1. El cable se lleva a tierra mediante una embarcación auxiliar. Allí se une a la red principal, o se fija para posteriores tareas. El cable queda flotando en el agua mediante unas boyas que lo posicionan con exactitud.
2. Se quitan las boyas, con lo que el cable empieza a sumergirse, y queda apoyado sobre el terreno.
3. Un ROV lo fija al terreno, y coloca una red protectora sobre él, al mismo tiempo que filma o fotografía el estado general del cable, y lo posiciona con exactitud mediante métodos similares a los que vimos para las sondas sumergidas.
4. El ROV va enterrando el cable a la vez que coloca la red protectora, con el fin de evitar daños sobre el cable.
5. El proceso puede acelerarse trabajando por tramos con varios barcos cableros. Si es así, en el área proyectada se encontrarán los dos cables, produciéndose en el barco su unión. Si lo realiza un solo buque se lanza un nuevo cable que se mantiene en superficie con una boya, repitiendo los pasos 2 y 3. Posteriormente se unen los cables.
6. Los cables se dejan caer, y el ROV realizará posteriormente las labores de protección y enterramiento.

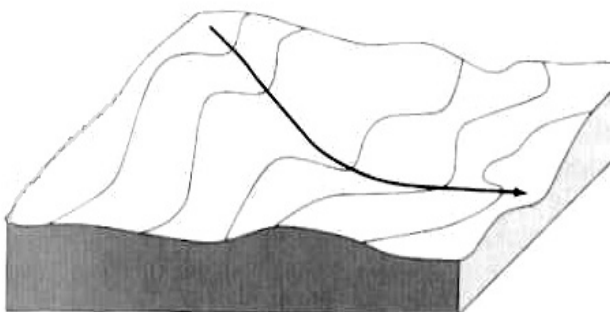


▲ Figura 49: procedimiento de tendido de cables submarinos.

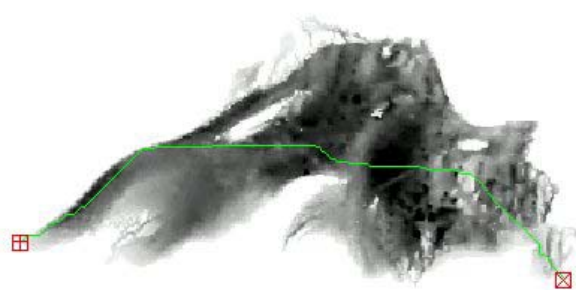
En algunos casos, existe la posibilidad de que no sea necesario enterrar el cable, o que la naturaleza del terreno no lo permita, y sea necesario aporte exterior de material (arena, rip-rap, etc.)

El coste de los cables que se emplean para transmisiones submarinas, es muy elevado. El cable submarino de fibra óptica consta de un núcleo de fibras ópticas del diámetro de un cabello, envuelto en una capa de plástico con resina, que a su vez está recubierta por una malla de alambres de acero y un tubo de cobre, que a su vez está contenido dentro de un grueso tubo de plástico de apariencia siliconada. Los cables de transporte de energía eléctrica tiene un peso aproximado de 24 Kg/m, por lo que sólo en material, y debido a las grandes longitudes, el estudio de optimización de la instalación de cable es muy relevante. Por ello, interesa optimizar las longitudes de cable a emplear, y es en este punto donde la cartografía submarina es de gran aplicación.

Aplicando modelos digitales del terreno, se puede estudiar cuál es la línea de mínimo coste (mínima longitud), considerando siempre las posibilidades mecánicas del cable. Existe software específico para este tipo de aplicaciones, que implementa la cartografía de la ruta a cubrir, las necesidades de cable, y la optimización del proceso.



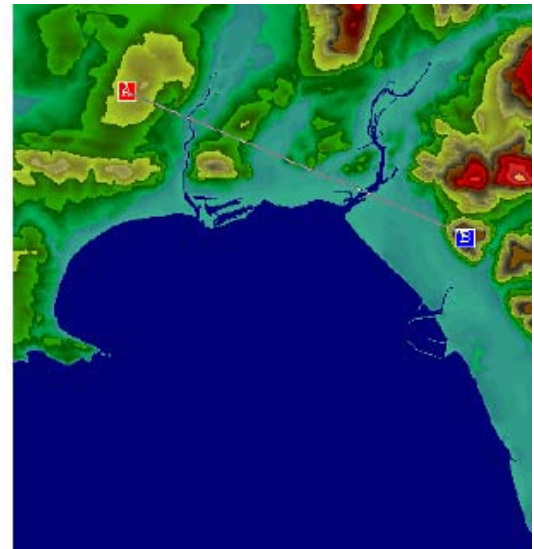
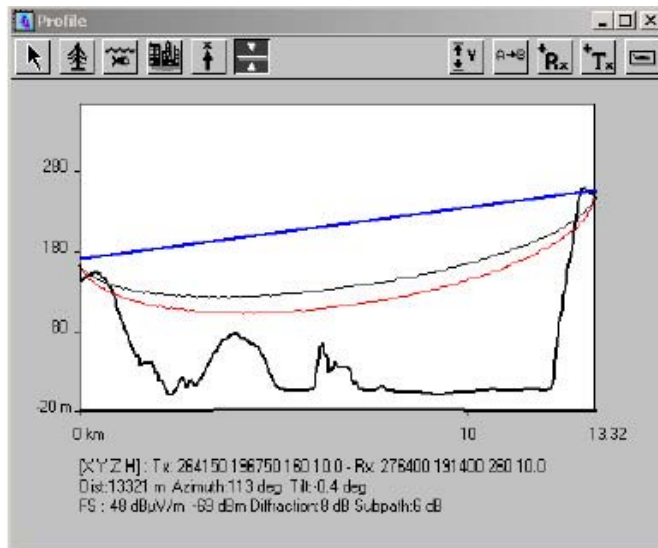
▲ Figura 50: Línea de mínimo coste (mínima distancia) sobre un terreno.



▲ Figura 51: Representación de la línea de mínimo coste sobre un modelo digital del terreno.



Siempre es preferible que el cable vaya apoyado sobre el terreno; sin embargo, hay casos en que esto no es así, como pueden ser zonas especialmente escarpadas, instalaciones temporales de cable... En una buena solución si la zona no es de pesca, y la profundidad no es peligrosa para el tránsito de embarcaciones. El software contempla esta posibilidad, y calcula la longitud y anclajes necesarios en función del tipo de cable.



▲ Figura 52: Aplicación informática específica para tendido de cable submarino.

## 5.2 INSTALACIÓN DE DUCTOS

Otra de las principales aplicaciones de la cartografía submarina es la planificación e instalación de ductos que, como ya se indicó anteriormente, es la denominación general que se da a los gasoductos, oleoductos y poliductos (conducciones que incluyen transporte de gas y petróleo).

Estos dispositivos de transporte han de estudiarse minuciosamente por la peligrosidad para el ecosistema de los productos transportados, y por el elevado coste de los mismos, lo que hace que la pérdida de material en el transporte sea intolerable. Además, las condiciones de transporte son bastante estrictas en cuanto a desniveles y pendientes permitidas, por lo que el estudio del terreno, desmontes, replanteo, etc. es crucial en su instalación. Por ello, la cartografía submarina de las zonas por las que transcurren estos conductos ha de realizarse con gran detalle, y en casos concretos se pueden requerir escalas de hasta 1:2500 de detalle.

El primer paso para la colocación de un conducto es el análisis de la cartografía de la zona por la que ha de transcurrir, para elegir las zonas más aptas para su trazado, y el estudio del terreno sobre el que se va a asentar.

Existen distintos tipos de tuberías, en función del caudal, presión y material que se transporte; sin embargo, en líneas generales, el valor característico para ductos submarinos son tuberías de 24 pulgadas (60,96 cm) de diámetro, aunque se emplean también tuberías mayores (de 36 pulgadas (91,44 cm), y mayores). Pero la tendencia actual es a instalar más de una tubería en



lugar de mayores diámetros, por los problemas que presentan. Estas tuberías pueden ir protegidas o sin proteger, soterradas o sin soterrar, y fijadas al suelo o libres, en función del tramo por el que discurren, la peligrosidad del mismo, etc. Hay que tener en cuenta las condiciones en que van a trabajar estos conductos, pues en algunos casos pueden estar instalados a más de 2000 m de profundidad, con lo que las presiones que actúen sobre los conductos pueden ser tan importantes como las presiones de trabajo de los mismos.

En los tramos de costa o próximos a ella es común que los ductos vayan protegidos y fijados al suelo con unas piezas de hormigón en forma de estrella de cuatro puntas, en las que va embebida la tubería como muestra la Figura 53. El transporte de estos elementos se realiza en superficie (Figura 54), ayudado por dos embarcaciones, dada la rigidez y longitud de la estructura.



▲ Figura 53: almacenamiento de tuberías para la construcción de un gasoducto.



▲ Figura 54: transporte en superficie de tuberías para la construcción de un gasoducto.



▲ Figura 55: Foto de un gasoducto ya instalado.

Una vez en el lugar de colocación se sueldan las tuberías y se comprueba mediante ROVs, dispositivos sumergibles, o buceadores, la estanquidad de las uniones. Se comprueba asimismo y se filma la totalidad de la tubería (Figura 56). Por último, se posiciona el conducto con las coordenadas exactas de su localización.

Mar adentro, las conducciones se colocan con verdaderos diques flotantes de grandes dimensiones, que permiten trabajar con estos enormes conductos hasta profundidades de unos 2150m, máxima hasta la actualidad, en el proyecto para un gasoducto *Blue Stream Pipelay* en el Mar Negro.

Aunque para pequeñas profundidades se puede seguir un procedimiento similar al que se empleaba con cables submarinos, en general el método más empleado es el de *J-Lay*, que consiste en ir colocando el conducto en forma de J (Figura 57) sobre el fondo y a la profundidad previamente fijada. La colocación de estos conductos es muy delicada, por lo que los parámetros han de ser estudiados minuciosamente en función de las características del conducto y del terreno.



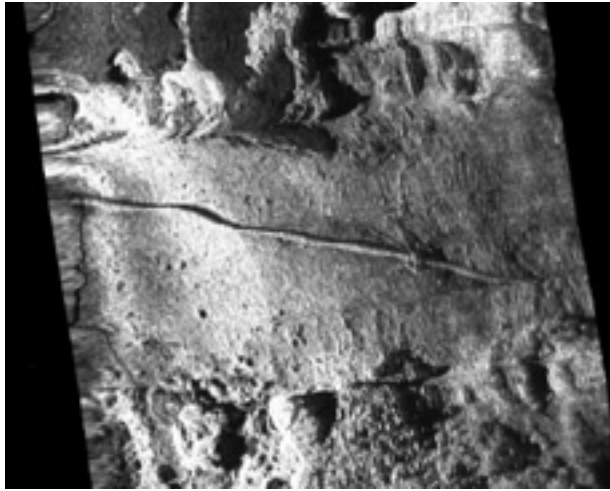
▲ Figura 56: Filmación con ROV de un gasoducto: (1) estado de un ánodo de sacrificio; (2) estado de una junta; (3) colocación sobre un bloque de piedra; y (4) daño en la unión de dos tramos. ▲ Figura 57: Proceso de colocación de un gasoducto por el procedimiento *J-Lay*.

Dadas las características de este tipo de conducciones, existen casos en los que se tiene que explicar el área dónde se va a colocar el ducto, eliminando en algunos casos grandes volúmenes de tierra. Existen dispositivos sumergibles ROVs que llevan a cabo esta labores, como el que se muestra en la Figura 58.

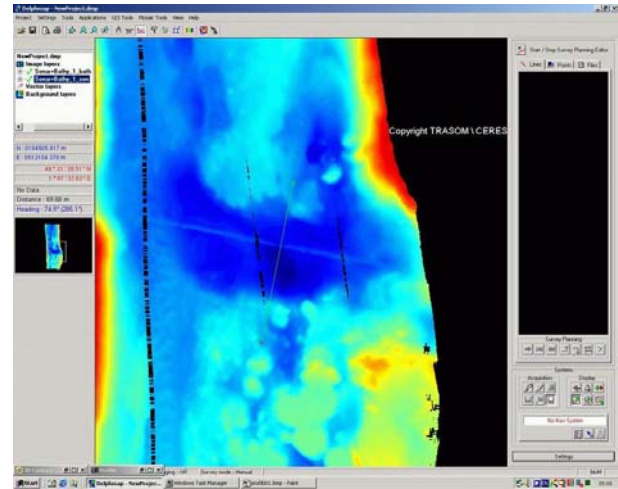


▲ Figura 58: ROV para tareas de explanación submarinas.

Por último, se puede realizar una prospección de la zona (mediante sonda lateral, preferentemente) que da como resultado la posición exacta del conducto, y el perfil del terreno sobre el que está asentado, comprobando que los movimientos de terreno efectuados son suficientes para la situación del conducto, como muestran las figuras 59 y 60.



▲ Figura 59: imagen de sonda lateral de una gasoducto.



▲ Figura 60: Batimetría con sonda lateral en la zona de instalación de un gasoducto. Se observa la uniformidad de la zona explanada.

## 6 CONCLUSIONES

En la actualidad, la actividad humana requiere un nivel de comunicaciones muy elevado. Estas comunicaciones se refieren a transmisión de datos, voz, etc. pero también a comunicaciones mediante vías de transporte de personas (por o sobre el mar, en lo que respecta a este trabajo), y al transporte tanto de energía, como de sus fuentes. La exploración del fondo marino es crucial en la construcción de puertos, puentes, optimización de los transportes navales y los recursos pesqueros, tendidos de cable, ductos, etc. Además, el interés científico nos mueve a conocer mejor el planeta en que vivimos, su comportamiento, etc., por lo que el estudio pormenorizado de un medio que ocupa tal cantidad de superficie hace necesario el desarrollo de técnicas de exploración específicas para cada necesidad. Por lo tanto, el campo de la cartografía submarina es de gran importancia en el desarrollo de estos medios de comunicación.

Por otra parte, la incorporación de las nuevas tecnologías a todos los pasos de la realización de una cartografía submarina —desde la planificación del proyecto, a la toma de datos, posicionamiento, procesado de los datos y obtención de cartas— hace posible la realización de más estudios en menos tiempo, y con un coste mucho menor.

No obstante, existen aún multitud de aspectos que mejorar en la técnica y en los materiales empelados, como se expone a continuación.

### **Desarrollo futuro de la Cartografía Submarina**

La posibilidad de desarrollo de las técnicas de exploración del fondo marino pasa por solucionar las limitaciones que plantean los equipos actuales.

La toma y almacenamiento de datos, tiempos más breves de procesado, y las fuentes de energía de los dispositivos subacuáticos son los puntos principales a mejorar. Por otra parte, sería deseable mayor modularidad de los aparatos, adaptando a las necesidades puntuales de cada proyecto los equipos disponibles. Esto va unido a la creación de un estándar de comunicación entre ellos, o al menos a garantizar la compatibilidad entre distintos equipos.

Estas necesidades se aplicarían, por un lado, a los sistemas montados en barcos y a los incorporados a satélites; pero también serían de gran aplicación a los sistemas de toma de datos montados en equipos que trabajen sumergidos y próximos al fondo marino que se explican más adelante, y que en la actualidad son cada vez más utilizados.

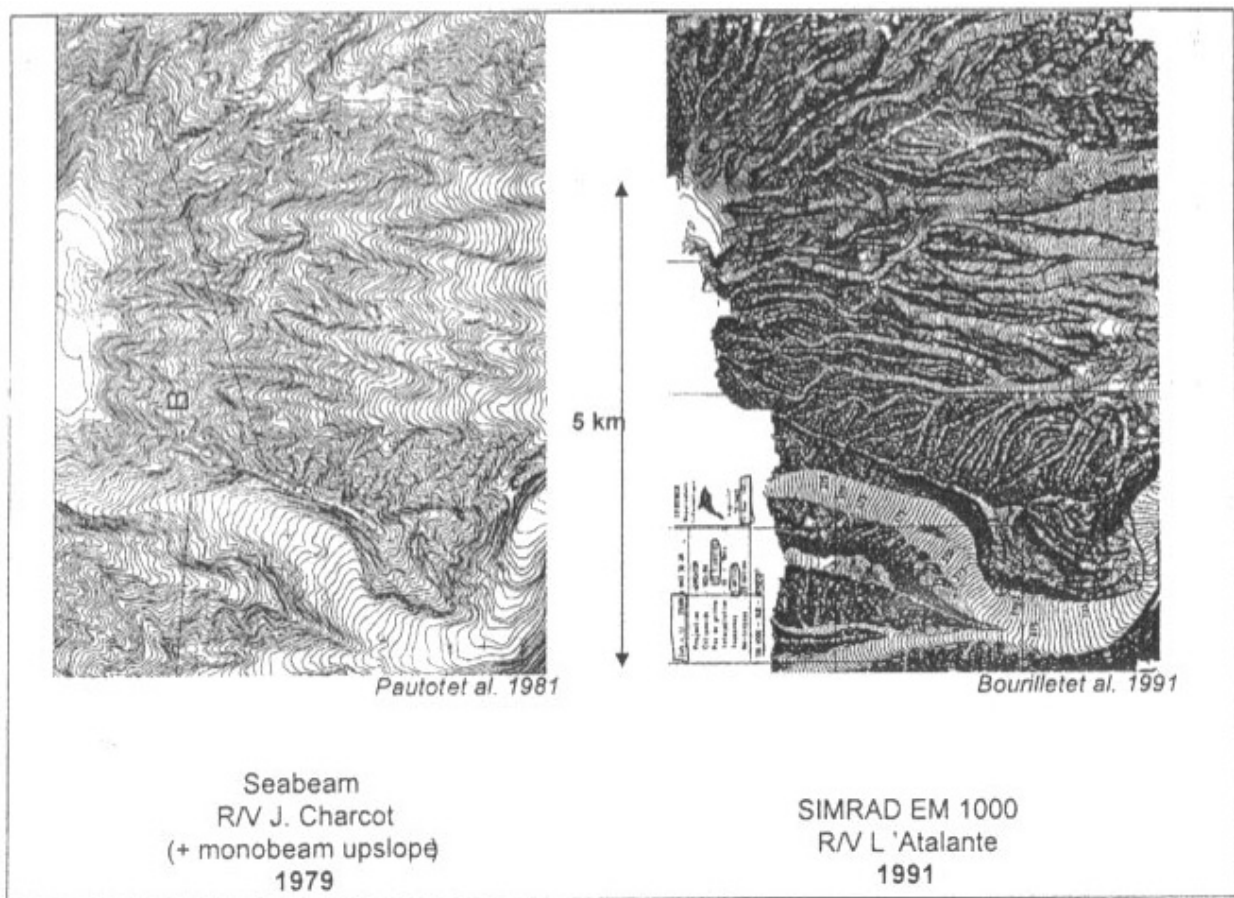
También tienen que mejorarse los sistemas para zonas someras, de poca profundidad (inferior a 5m), que actualmente se empiezan a tratar con sistemas de fotogrametría, o mediante la toma de imágenes. No obstante, sería deseable el desarrollo de sistemas específicos para estas zonas de tanto interés.

En lo que respecta a sistemas de procesado, interpretación y representación de datos, los

avances pasan por emplear sistemas acústicos más precisos, la compatibilidad entre sistemas, y la mayor velocidad de procesado hasta llegar al procesamiento en tiempo real. También se están creando aplicaciones informáticas de uso más sencillo para el usuario (*user-friendly softwares*)

Con estos avances, se podrían reducir tiempos de navegación y trabajo, y con ello disminuir los costes, a la vez que facilitaría el mantenimiento de los equipos.

Otro de los objetivos a medio plazo es crear una base cartográfica del fondo marino a nivel mundial, con mayores resoluciones a las existentes obtenidas por satélite. Además, no hay que olvidar que la representación cartográfica detallada del fondo marino debería incluir estudios y distribuciones de la comunidad bentónica y los ecosistemas marinos.



▲ Comparación entre batimetrías realizadas con distintas generaciones de sonda multihaz en la misma zona.



## 7 BIBLIOGRAFÍA, DOCUMENTACIÓN Y CONTACTOS

### BIBLIOGRAFÍA

*"Third European marine science and technology conference. Session Report. Seafloor characterisation"*. VV.AA. Editor: COMUNIDADES EUROPEAS. 1999. ISBN: 92-828-5060-9

*"The Floors of the oceans: text to accompany the physiographic diagram of the north Atlantic"*. Bruce C. Heezen, Marie Tharp, and Maurice Ewing .Editorial: The Geological Society of America. New York, 1959

*"Cartografía Submarina: el programa de estudio hidrográfico y oceanográfico de la Zona Económica Exclusiva Española"*. Juan Acosta Yepes. Revista DATUM XXI.

*"Características del estudio sistemático de la plataforma continental y talud superior españoles (proyecto SPACE). (2004). Metodología y primeros resultados"*. J. L. Sanz, O. Tello, N. Hermida, I. M. Fernández-Salas, y J. L. González-Serrano. Revista GEO-TEMAS 6 (2). Madrid, 2004. ISSN-1576-5172

*"Aplicación de las Tecnologías de la Información en el Desarrollo de Cartografía Submarina: SeaScanSoft"*. J. Lino Monteagudo Pereira Manuel D. Lago Reguera Xulio Fernández Hermida. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicacione. Universidad de Vigo

*"Análisis del oleaje para la modelización del relieve submarino en batimetrías realizadas con GPS. Aplicación en playas de Málaga"*. Francisco Manzano Agugliaro, Gil Manzano Agugliaro, Ignacio Colomer de la Oliva. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Santander, España – 5-7 junio de 2002

*"Morphology and characterisation of the relict facies on the internal continental shelf in the Gulf of Cadiz, between Ayamonte and Huelva (southern Iberian Peninsula)"*. L. M. Fernández-Salas, J. Rey, E. Pérez-Vázquez, J. L. Ramírez, F. J. Hernández-Molina, L. Somoza, J. R. de Andrés y F. J. Lobo. Boletín Instituto Español de Oceanografía 15 (1-4). 1999: 123-132. ISSN: 0074-0195

*"The Gulf of Cadiz: an unstable giant contouritic levee"*. T. Mulder et al. Geo-Mar Lett (2003) 23: 7–18. DOI 10.1007/s00367-003-0119-0

*"Patterns of bottom current flow deduced from dune asymmetries over the Gulf of Cadiz shelf (southwest Spain)"*. F.J. Lobo, F.J. Hernández-Molina, L. Somoza, J. Rodero, A. Maldonado, A. Barnolas. Marine Geology 164 (2000) 91–117

*"Volcanic eruptions on mid-ocean ridges: New evidence from the superfast spreading East Pacific Rise, 17°–19° S"*. John Sinton, Eric Bergmanis, Ken Rubin, Rodey Batiza, Tracy K. P. Gregg, Karl Grönvold, Ken C. Macdonald, and Scott M. White. Journal of Geophysical Research, vol. 107, N° B6, 10.1029/2000JB000090, 2002



“*Anteproyecto de instalaciones para la náutica recreativa en Canido – Vigo*”. Manuel Cameáns Rodríguez. INCAT. Marzo, 2004.

“*Bathymetry from Space: White paper in support of a high-resolution, ocean altimeter mission*”. David T. Sandwell, Walter H. F. Smith, Sarah Gille, Steven Jayne, Khalid Soofi and Bernard Coakley

## PÁGINAS WEB CONSULTADAS

### Batimetría y técnicas de medición

[www.ieo.es](http://www.ieo.es) (Página web del Instituto Español de Oceanografía)  
<http://www.ieo.es/zee/> (web del proyecto de la Zona Económica Exclusiva Española (ZEEE))

[www.ifremer.fr](http://www.ifremer.fr) (página del *Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer*, con gran cantidad de documentación sobre cartografía marina y submarina)  
<http://www.ifremer.fr/drogm/sommaire.htm>  
[http://www.ifremer.fr/flotte/equipements\\_sc/logiciels\\_embarques/caraibes/documentation.htm](http://www.ifremer.fr/flotte/equipements_sc/logiciels_embarques/caraibes/documentation.htm)  
<http://www.ifremer.fr/drogm/Realisation/carto/Carto/Sondeurs/index.html>  
[http://www.ifremer.fr/flotte/equipements\\_sc/equip\\_acoustiques.htm](http://www.ifremer.fr/flotte/equipements_sc/equip_acoustiques.htm)  
[http://www.ifremer.fr/flotte/equipements\\_sc/animationsflash/detectionmultifaisceau.swf](http://www.ifremer.fr/flotte/equipements_sc/animationsflash/detectionmultifaisceau.swf)

<http://ohi.shom.fr> (web de la Sociedad Hidrográfica Internacional, con numerosa documentación y normativa)

[www.ngdc.noaa.gov](http://www.ngdc.noaa.gov) (Web del *National Geophysical Data Center* (NGDC) del *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA))  
<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/relief.html>  
<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/coastal/startcrm.htm>  
<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/greatlakes/greatlakes.html>

[www.usgs.gov](http://www.usgs.gov) (página americana del *U.S. Geological Survey*)  
<http://walrus.wr.usgs.gov/pacmaps> (*Pacific Seafloor Mapping Project*)  
<http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of99-360/> (Web del proyecto *Multibeam Mapping the Long Beach Continental Shelf*)  
<http://pubs.usgs.gov/of/of01-123/index.html> (*Deep-Towed Chirp Profiles of the Blake Ridge Collapse Structure Collected on USGS Cruises 92023 and 95023 Aboard the R/V Cape Hatteras in 1992 and 1995*)

<http://www.ceresm.com> (web de una empresa dedicada a la topografía submarina)

<http://www.icm.csic.es/geo/gma/ergap/ergap.html> (web del proyecto ERGAP del Instituto de Ciencias del Mar del CSIC)

<http://www.utm.csic.es> (web de la Unidad de Tecnología Marina del CSIC)  
<http://www.utm.csic.es/Hesperides/equipamiento/geociencias/acustico/>

<http://perso.wanadoo.fr/cap.info> (web francesa del grupo CERES)

<http://deeptow.tamu.edu> (Web de un fabricante de equipos *deep-tow*)

[http://lifeposidonia.caib.es/user/Acciones/acc\\_a1\\_cs.htm](http://lifeposidonia.caib.es/user/Acciones/acc_a1_cs.htm) (web de un proyecto para la conservación de la Posidonia Oceánica, en la que se emplea la cartografía submarina)

<http://www.intec-hou.com/expertise/pipelines/resumes/default.asp> (web de una empresa de ingeniería que trabaja en conducciones submarinas)

<http://www.ugr.es/~pacolobo/Publications/SCI.htm> (Web de un profesor de la Universidad de Granada que trabaja en temas de topografía submarina)

### **Procesado de imagen**

<http://www.gpi.tsc.uvigo.es/pub/papers/sss.pdf> (web del grupo de Procesado de Imagen del Área de Teoría de la señal y Comunicaciones de la Universidad de Vigo)

<http://www.hydrographicsociety.org> (web de la *International Federation of Hydrographic Societies*)  
<http://www.hydrographicsociety.org/Articles/journal/2001/102-3.htm> (Procesado de datos en sondas multihaz)  
<http://www.hydrographicsociety.org/Articles/journal/2001/101-4.htm> (Procesado de datos en sondas multihaz)  
<http://www.hydrographicsociety.org/Articles/journal/2000/98-2.htm> (Simplificación de datos de batimetrías para previsualización en tiempo real)

### **Posicionamiento y DGPS**

<http://www.underwater-gps.com> (web de un fabricante de sistemas de posicionamiento bajo el agua)

<http://www.threeh.demon.co.uk> (web de una empresa inglesa de arqueología submarina, que trabaja con temas de posicionamiento, medición, etc. en el entorno submarino)

### **Tendido de líneas submarinas y ductos**

<http://www.pipe-line.com> (web de *Pipe Line & Gas Industry*)  
[http://www.pipe-line.com/archive/archive\\_00-08\\_dwt/00-08\\_dwt\\_survey-prothero.htm](http://www.pipe-line.com/archive/archive_00-08_dwt/00-08_dwt_survey-prothero.htm)

<http://www.iscpc.org> (web del *International Cable Protection Committee*)

<http://www.sil.si.edu/Exhibitions/Underwater-web/index.htm> (historia del cable submarino)

## 8 CD-ROM

### Contenido del CD-ROM:

- ☐ ..
  - Archivos .doc (*Microsoft Word*) y .pdf (*Adobe Acrobat*) con el texto del trabajo
  - Archivos .pps (*Microsoft PowerPoint*) y .pdf (*Adobe Acrobat*) con la presentación del mismo
- ☐ Artículos
  - Archivos .pdf (*Adobe Acrobat*) con artículos relacionados con el tema que se han utilizado en el trabajo
- ☐ Imágenes
  - Imágenes en formato JPG, JPEG, GIF y TIFF del trabajo
  - ☐ Otras
    - Otras imágenes no empleadas en el trabajo, pero sí en la presentación
- ☐ Otros
  - Ejecutable con el proceso de tendido de cable submarino
  - Vídeo con animación de un modelo digital del terreno