

Tema 13: Levantamientos Batimétricos

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

2. METODOS TOPOGRÁFICOS EN BATIMETRÍA

- 2.1 Métodos de posicionamiento planimétrico
- 2.2 Métodos de posicionamiento altimétrico
- 2.3 Métodos de posicionamiento 3D

3. OTROS MÉTODOS PARA OBTENER CARTOGRAFÍA BATIMÉTRICA.

- 3.1 Batimetría fotogramétrica
- 3.2 Batimetría por procedimientos fotográficos
- 3.3 Batimetría mediante sonar lateral
- 3.4 Batimetría mediante láser
- 3.5 Batimetría mediante satélites

4. BATIMETRÍA OFICIAL EN ESPAÑA

5. ESTUDIO DE CASOS

- 5.1 Levantamiento batimétrico del Embalse de S. Juan, 1991
- 5.2 Levantamiento batimétrico del Embalse de La Cierva, Murcia, 1989.
- 5.3 Levantamiento batimétrico de La Playa de la Albufereta, Alicante, 1993.
- 5.4 Levantamiento batimétrico de Las Salinas de Torrevieja con técnicas combinadas de GPS en tiempo real y ecosonda digital mediante la sincronización de ambos sistemas,1999.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. INTRODUCCIÓN

El término "batimetría" procede del griego, el Diccionario de la Real Academia de la Lengua lo define como "el arte de medir las profundidades".

En Topografía se entiende por batimetría el levantamiento del relieve de superficies subacuáticas, tanto los levantamientos del fondo de mar, como del fondo de cursos de agua, de embalses etc. Estos trabajos son denominados también topografía hidrográfica, cartografía náutica, etc. La labor del topógrafo consiste en realizar el levantamiento de los fondos, como si de un terreno seco se tratase.

El principal cometido en la realización de cartografía marina, en la obtención de *cartas de navegación*, es describir las características de la superficie subacuática para hacer posible la navegación por terrenos invisibles.

Las cartas de navegación han de incluir la forma y el contorno de las costas visibles desde el mar, la situación de los puntos notables de la costa y el relieve submarino destacando las zonas accidentadas y peligrosas para la navegación, e identificando las corrientes predominantes, la naturaleza geológica de los fondos, la declinación magnética y su variación anual, etc. De todo ello se ocupa la Hidrografía.

Al igual que en levantamientos convencionales, en las batimetrías la finalidad será la obtención de las coordenadas (X,Y,Z) de todos estos puntos. La parte más compleja y que caracteriza a los diversos métodos de levantamientos batimétricos es la determinación de la profundidad. Esta tarea se denomina operación de sondeo o simplemente sondar. La profundidad de un punto se obtendrá midiendo la distancia vertical entre el nivel del agua y la superficie del fondo.

Para obtener la verdadera cota del punto levantado se deben tener en cuenta una serie de correcciones entre las que se incluye la corrección por marea. Recordemos que las mareas son las variaciones periódicas en la altura del nivel del mar, debidas a las atracciones de los cuerpos celestes.

El estudio de la marea ha de hacerse en las cercanías de la zona en la que se está realizando el levantamiento, para poder reducir los sondeos al *datum* o cota de referencia.

Además del conocimiento de la mareas, en cualquier carta náutica son imprescindible los siguientes parámetros:

- Nivel medio del mar, al que referimos las cotas de los vértices.
- Nivel de la bajamar escorada: altura de las mareas mientras dura la operación de sonda, para reducir a la bajamar escorada.
- Unidad de altura y establecimiento del puerto, para que el navegante pueda calcular en cualquier momento los niveles y horas de pleamar y bajamar de un lugar dado.

Los antecedentes de los trabajos batimétricos se remontan a los egipcios que los realizaban con ayuda de piedras atadas a una cuerda. La longitud de la cuerda sumergida definía la profundidad. Los métodos como veremos a continuación han ido evolucionando con el paso del tiempo.

Las últimas tecnologías apuntan hacia el empleo de equipos con observaciones a satélites (GPS) y determinación de la profundidad por técnicas sónicas digitales, todo ello

computerizado y controlado en tiempo real por un potente software capaz de gestionar los datos de sendos equipos.

El desarrollo técnico e informático hace que las tareas en un levantamiento batimétrico se reduzcan, disminuyendo tiempos de ejecución, aminorando gastos y mejorando las precisiones finales, tanto en planimetría como en la determinación de la profundidad.

Comparando con los levantamientos terrestres, los levantamientos batimétricos presentan notables diferencias. La fundamental estriba en que *“en los levantamientos terrestres se cuenta con la estabilidad de los instrumentos de observación y con la repetibilidad de las mediciones”*¹. El movimiento de la masa de agua ocasiona movimiento en los instrumentos durante la observación y por otro lado no se puede contar con la posibilidad de estacionar una y otra vez en un determinado punto. Esta masa de agua constituye una barrera tanto para la vista del observador como para las radiaciones electromagnéticas, técnicas que han proporcionado un gran aumento de precisión en las medidas en la superficie terrestre.

Otro inconveniente en este tipo de trabajos es la necesidad de embarcaciones y equipos específicos de alto coste. El tipo de embarcación es una cuestión importante. Se debe procurar que sea espaciosa y que absorba las vibraciones emitidas por el motor, que tenga una estabilidad suficiente y que pueda adquirir velocidades adecuadas.

¹ VIDAL MASSO, Fernando (1974): pg. 61

2. METODOS TOPOGRÁFICOS EN BATIMETRÍA

- 2.4 *Métodos de posicionamiento planimétrico*
- 2.5 *Métodos de posicionamiento altimétrico*
- 2.6 *Métodos de posicionamiento 3D*

Como hemos indicado anteriormente, el objetivo de los levantamientos batimétricos es la determinación de las coordenadas X, Y, Z de los puntos del fondo. Hasta época reciente los trabajos necesarios para ello se dividían en dos partes, separando la metodología de obtención de los datos en planimetría de la altimetría. En cada punto observado se medía la situación horizontal y la profundidad por separado. En la actualidad la metodología GPS hace posible aunar ambas tareas.

Una batimetría realizada por métodos clásicos precisa en primer lugar que se realicen una serie de trabajos topográficos terrestres para poder representar la línea de costa (implantación de una red básica, trabajos de nivelación y la radiación). En una segunda fase se realiza el levantamiento del relieve submarino, que es el fin de todas estas operaciones.

Para las tareas de georeferenciación (enlace con un sistema de coordenadas existente), se aplican los métodos estudiados en los temas anteriores, determinando con precisión la posición de un determinado número de bases sobre el terreno cercanas a la zona de trabajo. Estas bases pueden estar referidas directamente a los vértices geodésicos o bien a otras bases de orden superior, todo ello dependerá de la distancia existente entre la zona de trabajo, de los vértices geodésicos y de las necesidades del trabajo.

Mediante métodos altimétricos determinamos las altitudes de los distintos vértices de la red altimétrica refiriéndolas a la superficie del nivel medio del mar.

Apoyándonos en estas bases establecidas, y con sus coordenadas perfectamente definidas, se observaran los puntos que representan la línea de costa y los accidentes del terreno.

Efectuado el levantamiento de la línea de costa, se procede a realizar el levantamiento batimétrico propiamente dicho. Este proceso se realiza en dos etapas:

- 1ª) Determinar la posición de la embarcación. Esto dependerá de si existe visual posible con las bases terrestres previamente determinadas, determinando desde ellas por métodos topográficos la posición del barco. En caso contrario tendríamos que apoyarnos en visuales astronómicas.
- 2ª) Sondar, es decir, determinar la cota submarina correspondiente a cada punto y que referiremos a la bajamar escorada.

Por último acabaremos representando gráficamente sobre un plano los datos procesados y procedentes de las medidas efectuadas anteriormente expuestas.

En el levantamiento batimétrico los puntos se organizan en *perfiles* (Figura 1). Los perfiles consisten en un conjunto de puntos alineados en una determinada dirección. Los perfiles se sitúan paralelos unos a otros, realizándose también algunos en direcciones transversales a los principales para una mayor cobertura de la zona. En algunos casos, posteriormente se replantean puntos singulares (X, Y conocida) para obtener la cota de los mismos.



Fig.1 Ejemplo de la ruta de navegación de la embarcación en un levantamiento batimétrico

El número de puntos a tomar depende de la escala del levantamiento. La norma tal como sucede en los levantamientos terrestres, es contar con un punto por cm^2 de plano, para poder asegurar la precisión en el curvado. La distancia entre los perfiles será la que corresponde a este centímetro a la escala del levantamiento. Las medidas sucesivas en cada perfil, normalmente y por la misma razón, habrán de ser de un centímetro gráfico a la escala del levantamiento.

El desnivel se mide respecto a la superficie del agua, por lo que el primer trabajo a proyectar será el de controlar la variación de cota que presente la lámina del agua en el transcurso del tiempo. En embalses no suele ser significativa esta variación en el tiempo que dura el levantamiento, pero en el mar sí, lo que hace necesario el estudio de mareas.

Mientras se lleva a cabo el sondeo es necesario observar continuamente la marea, con objeto de poder reducir cada sonda a la bajamar escorada.

Para estos trabajos se puede recurrir a mareógrafos que recogen la variación de la marea en un registro gráfico (Figura 2)

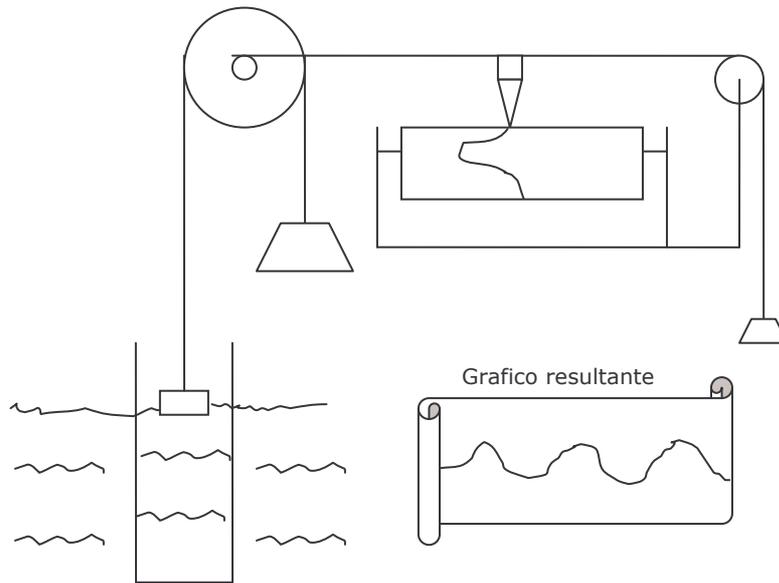


Fig.2 Esquema de registro del mareógrafo

También puede realizarse el control de marea con una nivelación mediante regletas, cada cierto tiempo, contrastando el nivel de la superficie de agua con respecto a un punto fijo en tierra, que habrá de estar lo más cercano posible a la zona a levantar (Figura 3)

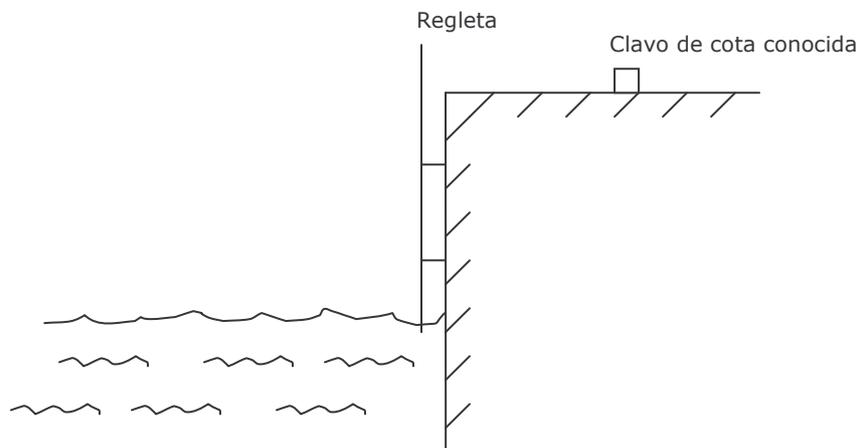


Fig. 3 Control de mareas mediante regletas

2.1 MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO PLANIMÉTRICO

El levantamiento topográfico de las costas realizado desde tierra, se realiza como en cualquier trabajo topográfico, pero para determinar la posición planimétrica de un punto marino (materializado por la embarcación que efectúa el sondeo), cuya profundidad queremos medir, es necesario recurrir a procedimientos especiales.

El problema consiste en guiar el barco por el perfil que pretende levantarse (replantar el perfil), perfil que se ha diseñado en función de la densidad de puntos que requiere el levantamiento; y dentro del perfil se han de determinar las coordenadas (X, Y) de los puntos en los que se mide la profundidad.

Existen varios métodos de posicionamientos para obtener las coordenadas (X, Y) de los puntos submarinos, métodos que han ido evolucionando a medida que lo han hecho las tecnologías:

- Métodos directos

Es el más básico y se utiliza para poca precisión. Se fundamenta en la materialización de una alineación, por medio de una cuerda atada a cada extremo de la orilla, a distancias determinadas. El método consiste en colocar el buque en cada marca de la cuerda y determinar en estos puntos la profundidad. Está limitado por las dimensiones de trabajos y la precisión requerida.

- Métodos ópticos

Consiste en medir mediante sextantes, el ángulo que forman en el punto dos referencias conocidas y así deducir la posición del buque por intersección inversa desde la embarcación. Este método obtiene precisiones de 3-5 m, siendo un sistema poco costoso.

- Radiación.

Se realiza con una estación total situado en tierra en un punto de coordenadas conocidas, y que se ha orientado a otro punto de coordenadas también conocidas. La cabeza del perfil se replantea previamente. El barco va recorriendo el perfil y se van observando topográficamente los puntos de la embarcación desde los que a su vez se sondea la profundidad. La observación se realiza con la estación total tomando ángulos horizontales, cenitales y distancia para poder calcular las coordenadas de dichos puntos posteriormente. El prisma va en la embarcación.

El mayor inconveniente es el movimiento del barco y el oleaje del agua. El prisma, que refleja la onda emitida por el distanciómetro, está en continuo movimiento y esto provocará una pérdida de señales.

- Bisección.

En tierra se estacionan dos teodolitos sobre dos puntos de coordenadas conocidas y se orientan los equipos visando a puntos también conocidos. Por intersección directa simple (bisección) se determina la posición del punto visado en la embarcación. El instante de toma de datos de los tres operadores (profundidad el operador en el barco, y los datos angulares de

los dos operadores en tierra) han de ser simultáneos. Recordemos que antiguamente (y para precisiones inferiores) se utilizaba para ello la brújula topográfica desde puntos terrestres, con observaciones angulares.

- Metodología GPS.

Los equipos GPS han hecho posible la aplicación de las observaciones a satélites en la determinación de la posición de puntos en la superficie terrestre o en embarcaciones. Los escasos tiempos de observación que se requieren permiten alcanzar elevadas precisiones, evitando la excesiva influencia del movimiento de la embarcación.

Se necesita situar una estación de referencia en tierra y llevar un receptor en la embarcación.

- Radiobalizas.

Basado en el método de navegación Loran y Decca. Esencialmente consiste en la medición de distancias entre el buque y dos puntos de coordenadas conocidas, por medio de ondas electromagnéticas, comparando diferencias de fase o de tiempos. Este método tiene un alcance de 1200 Km. con ondas UHF u 80 Km. con microondas.

2.2 MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO ALTIMÉTRICO

La determinación altimétrica consiste en determinar la cota de los puntos midiendo la distancia vertical existente entre la superficie del agua y el punto en el fondo. Estas cotas habrán de referirse siempre, a las coordenadas (X,Y) del punto en el que se está situado en el momento de la obtención de la profundidad. A esta determinación altimétrica del relieve submarino se la denomina operación de sondeo o, simplemente, sondar.

Ya hemos indicado anteriormente que el trabajo previo consistía en situar un origen altimétrico (punto de cota conocida) en tierra, respecto al cual se determina la cota de la superficie de agua.

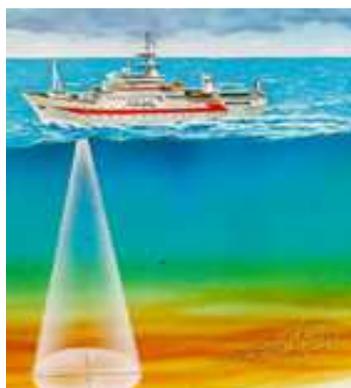


Fig. 4 Barco realizando sondeos².

El sondeo es la parte definitiva de cualquier batimetría y aporta los elementos suficientes para garantizar la seguridad en la navegación al facilitar información de las profundidades submarinas. Un perfecto conocimiento del relieve submarino exige un alto número de puntos de profundidad conocida o puntos sondados sistemáticamente espaciados. Las zonas que queden sin sondear se han de considerarse linealmente crecientes entre dos puntos de profundidad determinada, el método de sondeo es generalmente un método discreto con todas las consecuencias que ello conlleva.

Cuando se trabaja por perfiles, se usan generalmente dos sistemas para llevar a cabo el sondeo:

- por líneas rectas paralelas.
- por líneas radiales.

Las líneas rectas paralelas suelen presentar direcciones normales a la costa. La utilización de perfiles paralelos tiene el inconveniente de ocultar información entre líneas. Para reducir la pérdida de información, se realiza una densificación de la malla mediante perfiles transversales. La distancia entre cada dos líneas paralelas varía, según la escala del levantamiento.

El sistema de líneas radiales se empleará en aquellos lugares donde el perfil de costa cambie bruscamente de dirección y alrededor de islas de pequeña dimensión. Las líneas de sonda radiales se proyectarán de tal forma que la zona a sondear por este sistema quede suficientemente cubierta.

² CELADA, Jesús (1999): Proyecto Fin de Carrera, titulación de Ingeniería Técnica en Topografía

Es de vital importancia evitar que la embarcación sufra desviaciones con respecto al rumbo de navegación diseñado, si esto sucede se rompe la uniformidad del levantamiento. El control del rumbo se consigue de diversas formas:

- Manteniendo un rumbo fijo con una brújula.
- Señalizando los extremos de un perfil en tierra manteniéndolo lo más alineado posible.
- Materializando la línea con un láser o con un teodolito desde tierra.
- Mediante el sistema de radiobalizas, manteniendo un arco de radio constante (a distancias grandes se pueda confundir la cuerda con el arco).

Como hemos indicado, a la medida de la profundidad se denomina sonda o sondeo.

El instrumento que se utiliza se denomina SONAR: *Sound Navigation and Ranging*. Son aparatos que graban información de transmisiones bajo el agua. Consta de un emisor de ondas de sonido y de un receptor. Las ondas regresan tras rebotar en algún cuerpo material.

Mediante el sonar, la medida de la profundidad es continua a lo largo de la línea que sigue la embarcación, pudiéndose obtener bien en un registro gráfico o en un medio magnético. Para correlacionar este registro con las determinaciones planimétricas, se efectúan marcas en él para indicar el momento en que se realizan las medidas horizontales. Antes de utilizarla no debe olvidarse el realizar el calibrado.

El problema que presenta este tipo de aparatos es la posibilidad de obtener un registro erróneo al interponerse algún material en el camino de la onda, falseándose el relieve del fondo.

Desde el escandallo hasta las sondas de eco (ecosondas), los instrumentos de sondeo han ido evolucionando. Podemos encontrar los siguientes equipos:

- **Escandallo**
Las primeras sondas eran simples pesos de plomo de forma troncocónica (escandallo) atados a una cuerda (sondaleza), que se dejaba caer hasta tocar el fondo. Este tipo de sonda sólo se utiliza hoy en día para trabajos muy expeditos y cercanos a la costa.
- **Sondas mecánicas**
Formada por una bobina de cuerda de acero y un dispositivo de registro de profundidades. Está influenciada por las corrientes, lo que le hace perder la verticalidad pudiendo estar afectados los resultados de un gran error de desplazamiento. Además de este error, existía otra dificultad y es que los puntos de sondeo se elegían a ciegas, por lo que el relieve quedaba enmascarado en muchos casos, pudiendo pasar desapercibida una gran elevación o una fosa.
- **Sondas eléctricas**
En estos aparatos se aplica la electricidad reemplazando ventajosamente a las sondas anteriores. Un cilindro vertical lleno de mercurio hasta cierta altura, va sujeto a una cuerda que contiene tejido un doble conductor flexible y aislado; los dos extremos de los hilos son los reóforos de una pila que se halla en el buque y terminan en una caja cilíndrica; en el circuito, cerca de la pila, va un timbre; el cilindro se halla completamente cerrado. Mientras desciende el escandallo, el mercurio ocupa la parte baja del cilindro, no hay contacto y el circuito está abierto; pero en el momento en

que el cilindro ha tocado fondo se inclina, y el mercurio cubre los reóforos, los une eléctricamente, y cierra el circuito haciendo sonar el timbre. La sondaleza, arrollada a un tambor, le hace girar, y pone en movimiento a un contador que señala la profundidad.

- **Sondas acústicas**

Permiten una mayor rapidez en el levantamiento, a la par que proporcionan una mejor representación del fondo submarino, al registrar de una forma continua la línea que se va levantando. En 1920 se empezó a emplear esta sonda de eco o ecosonda. El principio fundamental consiste simplemente en registrar el tiempo que transcurre desde que un impulso sonoro es emitido desde el buque y recogido nuevamente en él tras reflejar en el fondo del mar. Se basa en el principio de que todo sonido producido cerca de la superficie del agua se refleja en el fondo y vuelve a la superficie como un eco. Como la velocidad del sonido en el agua es conocida, el problema se reduce a medir el tiempo empleado en el doble recorrido.

Existen los modelos portátiles, movidos por acumuladores y aptos para profundidades de 60 m, hasta grandes instalaciones permanentes, que pueden sondear hasta 10-12 Km de profundidad.

Los sondadores acústicos constan en esencia de las siguientes partes:

- Un aparato registrador, que a la vez es el órgano de control de todo el instrumento.
- Un generador de alta tensión, que lleva a su vez un condensador cuya descarga actúa sobre el transmisor de la onda sonora.
- Transmisor.
- Receptor, recibe la onda reflejada en el fondo del mar, que después de ser amplificada por medio del amplificador, se registra gráficamente en el aparato registrador.
- Amplificador.
- Aparato registrador.

El aparato registrador es quizá la parte más importante del sondador acústico.

- **Sondas ultrasónicas**

Son sondadores que utilizan como fuente sonora las oscilaciones de frecuencia audible. Presentaban el inconveniente, desde el punto de vista militar, de que la onda sonora esférica que generan se propaga en todas las direcciones posibles y puede ser captada por algún buque en inmersión. Estas sondas requieren, para sondear en grandes profundidades, mayor energía para producir ondas de gran potencia cuyo eco llegue al hidrófono con intensidad suficiente para su recepción. Puede ocurrir que en fondos muy escarpados la onda se refleje sobre cualquier superficie más próxima a la quilla que al fondo del mar. Estas dificultades han desaparecido con el empleo de ondas ultrasonoras de frecuencia inaudible superior a 20.000 periodos por segundo y longitudes inferiores a 7 cm, suponiendo que la velocidad de propagación es de 1450 m/s.



Fig. 5 Sondas ultrasónicas de última generación.

La principal característica de las ondas ultrasonoras está en su propagación a través del agua, haciéndolo solamente en forma de un haz bastante cerrado cuyo eje es normal a las armaduras del condensador.

2.3 METODOS DE POSICIONAMIENTO 3D

Como se ha indicado el problema en los levantamientos batimétricos es correlacionar la posición planimétrica y la determinación de la profundidad para no introducir errores en la determinación de la posición del punto situado por debajo de la superficie del agua, y que va a ser el que se represente en la cartografía final.

El problema del movimiento en la superficie se consigue disminuir al aumentar la rapidez en la determinación de las coordenadas del punto radiado.

Ambas cuestiones afectaban considerablemente a la precisión de la cartografía batimétrica.

Como hemos visto existen gran variedad de métodos para realizar los levantamientos batimétricos, pero sin lugar a dudas, el más extendido y utilizado actualmente, es el método combinado de GPS + Ecosonda digital.



Fig. 6 Equipo Ecosonda completo: sensor, transductor, impresora, PC y batería

El equipo de sondeo está proyectado para producir el sonido, recibir y amplificar el eco, medir el tiempo transcurrido desde la emisión y la recepción del sonido, convertir este intervalo de tiempo en unidades de profundidad y registrar estas medidas de profundidad en una banda de papel arrollada sobre un tambor giratorio.

El sonido es producido por un transductor, que automáticamente convierte un impulso eléctrico en una onda sonora. En instalaciones permanentes de sondeo por eco, este dispositivo va montado en el casco del barco de sondeo; en los modelos portátiles el transductor va montado por lo menos 50 cm por debajo del nivel del agua, y preferiblemente a ras con la quilla. En función de la profundidad existen diversos transductores. Para los sondeos en aguas profundas se hace uso de señales de baja frecuencia, ya que las señales de alta frecuencia están sujetas a una mayor absorción y necesitan una potencia inicial más elevada cuando se emplean en aguas muy profundas.

El transductor también recoge el eco reflejado por el fondo y lo convierte en una señal eléctrica, que es amplificada y registrada en unidades de profundidad sobre una banda graduada.

Las ondas sonoras son emitidas por el transductor a intervalos de tiempo muy cortos; así por ejemplo un modelo portátil de sonda de esta clase, cuya máxima

profundidad de alcance no llega a los 75 m, hace los sondeos a la velocidad de 600 por minuto.

Debido a la pequeñez de intervalos entre uno y otro sondeo, el registro de los mismos sobre la banda en movimiento es una línea continua que representa el perfil del fondo por debajo del bote en movimiento.

Las sondas de eco tienen una precisión instrumental que varía desde unas centésimas por ciento de la profundidad en las grandes instalaciones permanentes, hasta un medio por ciento de la profundidad en las máquinas portátiles.

La precisión en la medida puede ser definida en función de la resolución del equipo acústico. Ésta está determinada por:

- Duración del pulso o longitud: un pulso tiene una duración finita, determinada por la frecuencia, la velocidad de propagación y la duración del pulso. La resolución es la mitad de la duración del pulso.
- Angulo de incidencia de la onda en el objetivo: si el rayo, no incide normal a la superficie a representar, la longitud del pulso efectivo será mayor disminuyendo entonces la precisión.
- Resolución del medio de grabación: se debe disponer de un medio de recogida de datos capaz de recoger ondas reflejadas con una resolución acorde con el pulso. Normalmente se graba sobre papel tratado químicamente, o bien sobre papel carbón, también se pueden registrar los datos en medio magnético.
- Naturaleza del objetivo: las superficies en las que rebotan las ondas pueden ser de distinta naturaleza.
- Ancho de emisión de la transmisión: la energía devuelta por un objeto depende de su tamaño, de la densidad de sus elementos y de la inclinación del proyector. Se recogerán mejor las ondas que rebotando en los lados del objeto se reflejen en la dirección del buque.

El sonido atraviesa el agua a una velocidad casi constante, siendo el valor medio de la velocidad de propagación de las ondas acústicas en el mar de $1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. variando con la temperatura, salinidad y profundidad (presión). Existen tablas y nomogramas que dan la corrección que hay que aplicar para los distintos valores de la temperatura, la salinidad y la profundidad.

Muchas de las sondas portátiles están equipadas de mecanismos y software capaz de corregir los sondeos teniendo en cuenta estos valores para obtener la profundidad real del sondeo.

La ecosonda es muy utilizada en los grandes pesqueros para localizar bancos de pesca y en los buques oceanográficos para realizar batimetrías.

La metodología GPS ha permitido aumentar la precisión planimétrica. El registro de tiempos que en ella se efectúa permite sincronizar los datos de los ficheros GPS con los datos de los ficheros de la ecosonda, mediante el campo común "tiempos", teniendo especial cuidado en la sincronización de relojes de ambos tipos de registros.

El método de observación GPS que más precisión nos puede aportar es el método diferencial en tiempo real anulándose las principales fuentes de error y disponiendo de nuestra posición precisa en el instante de medición. Esto exige el trabajar con dos receptores GPS de forma simultánea.

Para trabajar en tiempo real se utiliza un radio enlace entre la estación de referencia y el equipo móvil que va instalado en la embarcación.

Un sistema que realice levantamientos batimétricos según este método ha de realizar fundamentalmente dos tareas:

- Navegación, el sistema debe ser capaz de indicar la ruta a seguir para no crear zonas de solapes indeseados, o bien, de guiar la embarcación por unos perfiles predeterminados.
- Sincronización de los datos recibidos por el instrumento de medidas de profundidades (ecosonda) con el instrumento que nos indica planimétricamente donde se ha producido esta medida de profundidad (GPS).

La precisión que se puede obtener en la posición estará condicionada por el tipo de observables que utilicemos, código o fase. Esta precisión va a ser la que determine nuestra metodología de trabajo.

I) GPS (Fase)+ ECOSONDA DIGITAL

Este método nos ofrece precisiones del orden de 2-3 cm±1ppm. La sincronización de datos obtenidos en el mismo instante por el GPS y la ecosonda es mucho más eficaz, con grados por debajo del segundo. Los errores producidos por el efecto de las mareas y variación de altura debido al oleaje quedan total y automáticamente eliminados. Además no precisa de instrumentación clásica para completar el trabajo en tierra.

Todas estas características hacen que este método sea el más eficaz y de mayor rendimiento en las operaciones de levantamientos batimétricos.

Se han llegado a comparar modelos digitales del terreno obtenidos según esta metodología con modelos fotogramétricos y en ningún caso las diferencias excedían de los 5 cm.

Básicamente el sistema se compone de los siguientes elementos:

- Como estación de referencia dispondremos de un GPS de doble frecuencia, unidad de control conectada a un radio-modem, enviando correcciones de código y fase con observables de fase en tiempo real.
- El sistema de a bordo de la embarcación está compuesto por un receptor GPS de doble frecuencia, unidad de control en la que corre el software para el tratamiento de observables de fase en tiempo real, radio-modem recibiendo las correcciones procedentes del equipo de referencia, ecosonda digital y PC portátil.

En cuanto a las conexiones, se puede observar que existen dos variantes, con relación al sistema estándar de batimetría con GPS:

- En primer lugar, consideramos el hecho de utilizar como opción más aconsejable receptores de doble frecuencia, puesto que al trabajar con

medidas de fase, es necesaria la inicialización para la resolución de ambigüedades, y tan solo los equipos de doble frecuencia son capaces de inicializar en movimiento (OTF), evitando por tanto, tener que desmontar el equipo de la embarcación e inicializar en tierra cada vez que el sistema se quede con menos de cuatro satélites. Con un equipo de estas características y utilizando el método apropiado, se puede obtener en tiempo real, coordenadas en el sistema de referencia local, con precisión de $2-3 \text{ cm} \pm 1 \text{ ppm.}$, tanto en planimetría como en altimetría. El hecho de obtener la cota del punto nos permite realizar la batimetría sin tener en cuenta el estado de la marea, y corregir la variación de altura de la antena GPS – transductor debido al oleaje.

- En segundo lugar, se consigue un grado de sincronización mucho más alto debido a que los registros tomados, tanto la posición de la antena GPS (X,Y,Z) como la profundidad medida por la ecosonda, incorporan una señal de tiempo enviada por el receptor GPS, que nos permite realizar una correlación entre ambas medidas.

Para aplicar este método es imprescindible que la ecosonda incluya la posibilidad de entrada del mensaje NMEA (el cual incluye el instante de la toma de la posición en tiempo GPS), para que de esta manera asocie instante de toma de posición (X,Y,Z) al instante de toma de profundidad.

Los datos de profundidad, más tiempo, quedan almacenados en el PC portátil, el cual incluye el software de navegación, cuya única misión, es la de planificar los perfiles y guiarles por ellos. De esta manera evitamos la deficiente sincronización que nos proporciona este tipo de programas.

Existe una configuración alternativa que nos permite simplificar el sistema. Para ello es necesario que el sistema GPS posea una unidad de control con la capacidad de gestión y replanteo de líneas (perfiles). De este modo podemos eliminar de la configuración el software de navegación y sustituir el PC por un palmtop PC cuya autonomía y tamaño es más apropiado para su instalación en pequeñas embarcaciones.

II) GPS (Código)+ ECOSONDA

Es el método utilizado desde algunos años por numerosos profesionales para realizar levantamientos batimétricos y que muchos fabricantes de accesorios para la navegación, han incorporado en su gama de productos como equipos estándar y soluciones totalmente terminadas, pero que solamente se pueden emplear para levantamientos expeditos con precisión del entorno del metro.

Este sistema proporciona un rendimiento inigualable comparado con cualquiera de los métodos anteriormente citados, ya que podemos levantar puntos (X,Y,profundidad) con cadencia de un segundo.

Por otra parte tampoco es necesario un operario en tierra que vaya guiando la embarcación, puesto que disponemos de la información necesaria para situarlo con suficiente precisión sobre el perfil teórico.

Pero por el contrario tendremos estos errores e inconvenientes:

- Error en la posición de carácter submétrico debido a la precisión que proporcionan las observables GPS de solo código.

- Errores debido a la sincronización entre el instante de toma de posición y profundidad: los programas estándar de sincronización no están diseñados para trabajar con alta precisión, ya que la sincronización se realiza con asignación de tiempos por entrada de datos en las puertos serie del PC. Hay algunos programas de navegación en los cuales podemos introducir un retardo aproximado desde el instante de toma de posición, o profundidad hasta el momento de anexión de datos de profundidad y posición. Hemos podido estimar que este retardo es variable en función de diversos factores, estimando que el retardo sufrido se halla en el entorno de 1 a 3 segundos. Este error se hace patente cuando el terreno a levantar tiene una gran pendiente y conforme se aumenta la velocidad de desplazamiento de la embarcación
- Sigue indeterminado el problema de mareas y oleaje de manera integrada en el mismo sistema, debiendo corregirse estos errores.
- Se precisa de instrumentación clásica para realizar el trabajo de tierra; cabecera de perfiles, bases, etc.

Básicamente el equipo consta de:

- Equipo GPS de Referencia con radio-modem incorporado emitiendo correcciones de código.
- Equipo GPS móvil con radio-modem incorporado recibiendo correcciones de código. Este equipo envía por el puerto RS-232 uno de los mensajes NMEA a un ordenador portátil.
- Ordenador portátil que sincronice la señal NMEA recibida del GPS con la medida de profundidad realizada y enviada por la ecosonda.
- Ecosonda y transductor con medida continuamente enviada al ordenador.

Se estaciona en tierra, en un punto de coordenadas conocidas, un equipo de una o dos frecuencias enviando por un radio-modem correcciones estándar de código RTCM. En la embarcación se coloca un equipo GPS de una frecuencia (suficiente para este tipo de aplicación) y la ecosonda digital. Es importante instalar la antena GPS sobre la misma vertical que el transductor de la ecosonda, de esta manera no será necesario el realizar correcciones por la excéntrica de antena GPS y transductor.

Una vez instalados estos dos elementos se envía a través de los puertos serie de un PC el mensaje NMEA corregido de pseudodistancia, desde la estación de tierra; y por otra parte la lectura de profundidad desde la ecosonda.

En el PC va instalado un programa de navegación, que es el encargado de realizar las dos tareas que debe realizar un equipo batimétrico: navegación y sincronización de los datos procedentes de la ecosonda y el GPS (X,Y,profundidad).

Decíamos que es una solución estándar por que los programas de navegación incorporan el protocolo de comunicación con las distintas marcas y modelos del GPS así como de ecosonda.

3. OTROS MÉTODOS PARA OBTENER CARTOGRAFÍA BATIMÉTRICA

- 3.1 Batimetría fotogramétrica
- 3.2 Batimetría por procedimientos fotográficos
- 3.3 Batimetría mediante sonar lateral
- 3.4 Batimetría mediante láser
- 3.5 Batimetría mediante satélites

3.1 BATIMETRÍA FOTOGRAMÉTRICA

El uso de la fotogrametría ha permitido mejorar la precisión y aumentar la rapidez en los levantamientos batimétricos. Su uso queda limitado a aguas no muy profundas, siendo esta variable (la profundidad) la principal limitación de este método.

Comparada con la fotogrametría terrestre, la fotogrametría batimétrica exige la aplicación de correcciones teniendo en cuenta factores tales como las mareas, el índice de refracción del agua, la presencia de algas, la salinidad, el plancton, la temperatura del agua, etc. Tiene la ventaja de que permite obtener un número mayor de curvas de nivel por lo que el fondo queda mejor definido.

Los trabajos realizados en la Costa Sur de Puerto Rico permitieron concluir que el solapado óptimo de las fotografías es del 65% al 70%. Con este solapado y en zonas cercanas a la costa, se ha obtenido un error en la determinación de la profundidad menor del 2%.

3.2 BATIMETRÍA POR PROCEDIMIENTOS FOTOGRÁFICOS

Este método es aplicable en aguas poco profundas. Consiste en estudiar las variaciones del espectro visible en imágenes obtenidas desde aeroplanos y satélites. Las fotografías se realizan con películas capaces de producir un alto contraste cromático.

“Con un conjunto de varias imágenes del mismo sitio, tomadas en diferentes días, bajo diversas condiciones, podemos combinar las variables temporales de las imágenes (que dependen del momento en que se toma la fotografía, tales como nubes, sedimentos,...) y sacar un promedio, con lo que resaltaremos las características estables del fondo”³.

Las imágenes de los sucesivos vuelos de la misma zona se digitalizan y se fusionan estadísticamente. Finalmente se obtiene una imagen sintética como mezcla de las distintas bandas y en ella se correlaciona claridad-profundidad.

Las fotografías aéreas también nos dan una idea clara del posible acceso a una costa que no se conoce, así como: las rutas más convenientes, la existencia de islas, arrecifes; lugares más convenientes para efectuar desembarcos; caminos, sendas próximas a la costa, etc.

3.3 BATIMETRÍA MEDIANTE SONAR LATERAL

Esta metodología es conocida como *Wealds: Weapon Research Establishment laser Depth Sounding*.

³ GALLARDO SANCHA, J. y otros (II) (1992): pg. 68.

Permite obtener mapas tridimensionales del fondo mediante un emisor-receptor de ondas acústicas. Se utiliza con varios barcos moviéndose en paralelo, obteniéndose una carta continua y completa.

3.4 BATIMETRÍA MEDIANTE LASER

Consiste en un sonar que funciona con láser, y permite medir de día profundidades de 2 a 30 metros, con un error máximo de 1 m. y de noche puede llegar a alcanzar los 60 metros de profundidad. Puede transportarse en un avión o en un barco.

3.5 BATIMETRÍA MEDIANTE SATÉLITES DE TELEDETECCIÓN

La información que proporcionan los satélites ha hecho cambiar los métodos batimétricos tradicionales. Se han obtenido buenos resultados al aplicar esta metodología en mares poco profundos.

Entre los satélites que se han utilizado para estos fines estaban:

- GEOSAT: lanzado por la US Navy en 1985, se ha utilizado para múltiples levantamientos batimétricos. El problema que presentaban era la imposibilidad de su uso en rutas marinas por el conocimiento impreciso del geode y la baja resolución. Por otra parte se necesitaban varias semanas para cubrir determinadas zonas.
- LANDSAT MSS (Scanner Multiespectral) (EEUU): se utilizó para levantamientos batimétricos en órbita polar, especialmente en la localización de arrecifes.

El método consiste en determinar la profundidad según la claridad, aplicando el hecho de la atenuación de la luz con la profundidad. Las variables tales como el tipo de agua o tipo de algas se controlan utilizando las bandas del espectro MSS-4 y MSS-5. En cada una de ellas, según el grado de inclinación, se ha determinado la profundidad a la que puede utilizarse en bajo acercamiento (a) o gran acercamiento (b):

MSS-4: a) 20-25 m
b) 30 m

MSS-5: a) 6 m
b) 7,5 m

Las imágenes se comparan digitalmente tras aplicar distintas correcciones.

Este satélite presenta la ventaja de que recorre la órbita en sólo 18 días (ciclo de repetición de cobertura) y que tarda tan solo 25 segundos en obtener una imagen, pudiendo aplicarse el método multitemporal (analizar imágenes de un mismo lugar, obtenidas en distintos momentos).

- SPOT: Systeme Probatoire d'Observation de la Terre (Francia): lanzado en 1986, 1990 y 1993, con bandas en el visible y en el infrarrojo próximo. Tiene una órbita menor que el Landsat, por lo que se consigue una mayor resolución. Permite obtener imágenes estereoscópicas combinando dos imágenes de la misma área adquiridas en diferentes fechas y diferentes ángulos. Permite obtener mapas de la temperatura de la superficie del agua, monitorización de

zonas costeras, dinámica de arroyos en la costa, cartografía de sedimentos costeros, etc.

- RADARSAT: Puesto en órbita en 1994, es un proyecto canadiense, con el objetivo de estudiar la navegación en el Océano Atlántico.

En Canadá se está experimentando con sistemas láser en aguas profundas y fotografía aérea en aguas poco profundas; obteniéndose muy buenos resultados en la obtención de mapas del fondo submarino con rapidez y precisión.

(Queda pendiente la actualización del uso de satélites en levantamientos batimétricos)

4. BATIMETRÍA OFICIAL EN ESPAÑA

Los países marítimos siempre han tenido necesidad de una cartografía náutica. La realización de la misma, debido a las exigencias cada vez mayores de precisión y a la necesidad de una constante actualización, fue pasando de iniciativa privada a organismos oficiales.

En España para estos fines se creó en 1789 el Depósito Hidrográfico, que se transformó en 1944 en el Instituto Hidrográfico, dependiendo del Estado Mayor de la Armada.

A nivel internacional la institución encargada de las tareas de coordinación de la cartografía marítima, tuvo su origen en la creación en 1921 del Bureau Hidrográfico Internacional (B.H.I.) que organiza conferencias cada 5 años y potencia el desarrollo de las técnicas y la realización de los levantamientos hidrográficos.

En la actualidad el Instituto Hidrográfico de la Marina representa a España en la O.H.I., siendo el responsable de los levantamientos hidrográficos y de la cartografía de nuestras costas. Para ello efectúa los levantamientos hidrográficos, geodésicos, exploraciones del relieve submarino y los trabajos geográficos y fotogramétricos necesarios.

El reto al que se enfrenta el Instituto es la necesidad de una constante actualización de la representación del relieve submarino y la necesidad de una mayor exactitud debida al aumento de la navegación submarina, de la navegación deportiva, al incremento del número de tonelaje de los buques, a los trabajos de tendido de cables y de prospección realizados en el mar, etc.

El objetivo que pretende es el actualizar el levantamiento de las costas cada 15 años y de las zonas portuarias cada 5 años.

Los buques de la marina utilizaban el sistema de posicionamiento por radiobalizas (2 estaciones fija en tierra y una móvil en el barco), logrando un alcance de 200 millas de día y 150 millas de noche, con una precisión de 4 m en la situación. La profundidad se obtenía por sondeo obteniéndose gráficos de estos trabajos. Para correlacionar la situación y el sondeo se trazaban marcas en los gráficos.

La metodología y la descripción de los trabajos que realiza el Instituto Hidrográfico se describe en el artículo:

ACOSTA, Juan (2004): Cartografía Submarina. El Programa Estudio Hidrográfico y Oceanográfico de la Zona Económica Exclusiva Española. Datum XXI. Año II, Nº 4 Abril-Mayo-Junio 2003, pp 4-18.

Actualmente se está automatizando el sondeo mediante sondadores digitales y realizando la correlación (entre los datos de situación con los de sonda y hora) de forma automática con ordenadores. El ordenador proporciona directamente las coordenadas geográficas, haciendo posible la navegación por derrotas rectilíneas.

5. ESTUDIO DE CASOS

5.1 LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO DEL EMBALSE DE S. JUAN, 1991⁴

Para realizar el levantamiento del Embalse de S. Juan se comenzó estudiando sobre una cartografía a escala 1/50.000 la ubicación de los vértices de una red básica. Estos vértices debían tener buena visibilidad de la zona a levantar. A continuación se proyectaron los perfiles (equidistantes 1 cm a la escala del levantamiento, es decir 10 metros) y de algunos transversales que densificasen la red de puntos.

Los trabajos de campo consistieron en:

- Observación de la red básica:

Triangulación (T2-Wild) y trilateración (DI-1000) de los cuatro vértices previamente seleccionados y señalizados.

- Densificación de la red básica:

Implantación de puntos para densificar la red básica, con objeto de completar la visibilidad de la zona a levantar:

- ✓ 2 poligonales de 3 vértices
- ✓ 1 destacado

- Enlace con la red geodésica:

Poligonal de 6 vértices encuadrada en dos vértices de tercer orden, para el enlace con la red geodésica y proporcionar coordenadas UTM a la red (T2-Wild y DI-3000).

- Radiación terrestre:

Taquimétrico terrestre hasta la cota 584 m. (la de la superficie de agua).

- Radiación batimétrica:

- ✓ La situación planimétrica se determinó mediante 2 radiobalizas que se situaron en 2 vértices de la triangulación (Fig.7). El equipo que se embarca en este proyecto es el denominado TRISPONDER (Fig.8).

⁴ MOLERO RIESCO, Ana Ma; UCENDO GOMEZ, Alejandro; CASADO GARCÍA, Rosario Inés; GARCIA GARCIA, Jose Manuel (1991): Proyecto Fin de Carrera "Levantamiento batimétrico del Embalse de S. Juan". E.U.I.T. Topográfica de Madrid. Marzo.

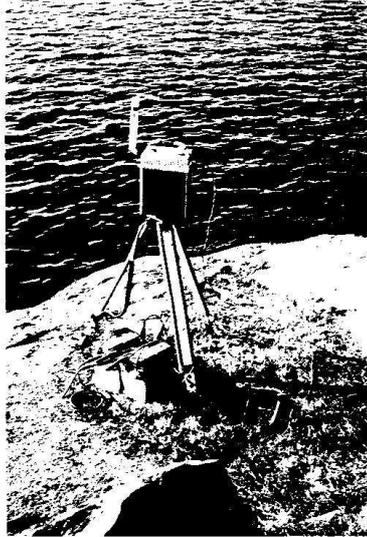


Fig. 7 Radiobaliza

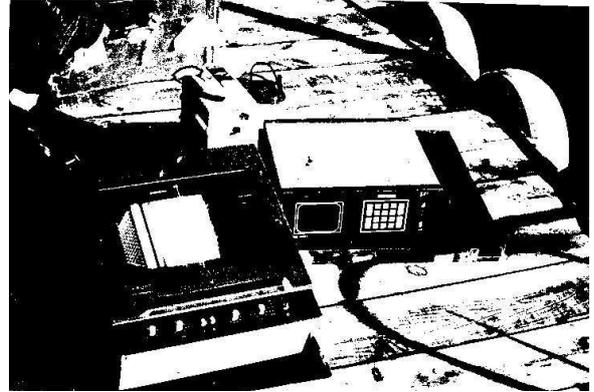


Fig. 8 Trisponder

- ✓ La profundidad se obtuvo con la sonda DESSO-20 (Fig.9). Esta sonda proporciona información digital de la profundidad así como un registro gráfico con marcas de los puntos situados planimetricamente. En el registro (Fig. 10), la profundidad de un punto se obtiene midiendo con escalímetro.

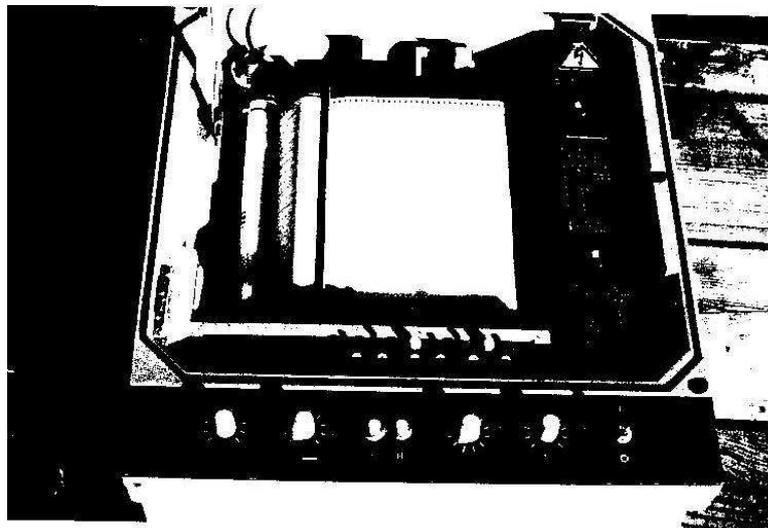


Fig. 9 Sonda DESSO-20

Ejemplo de perfil de profundidad obtenido con la sonda.

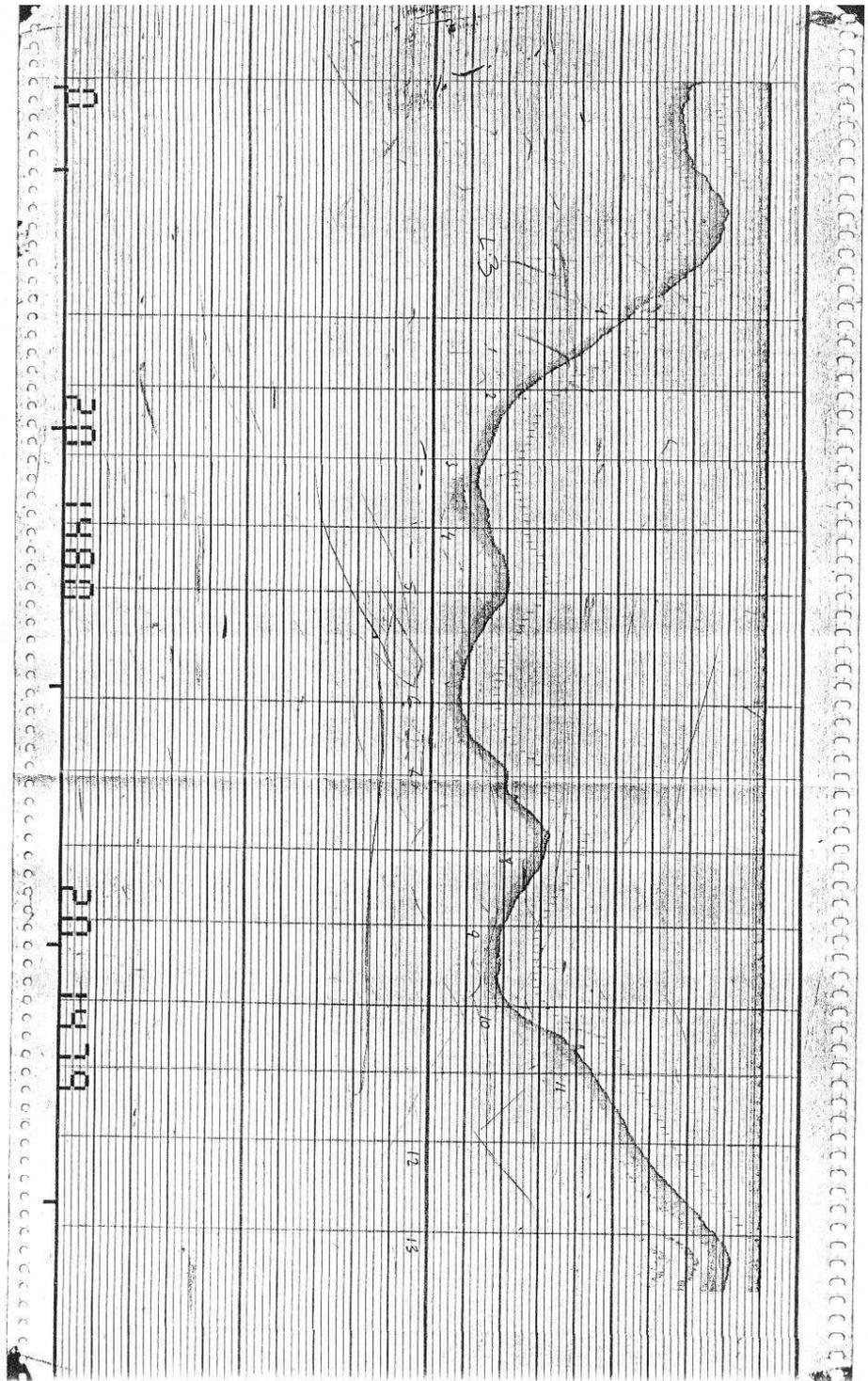


Fig. 10 Ejemplo de perfil de profundidad obtenido con la sonda

Para determinar la posición del barco, se introducen en el Trisponder las coordenadas de los puntos en los que están situadas las antenas y el desnivel entre el datum y cada antena, así como la situación del primer perfil y la separación de puntos en él. El barco se alinea en el primer perfil, en el primer punto que se desea de él, con ayuda de información que aparece en la pantalla del Trisponder (va indicando distancia al perfil y al primer punto, tratándose de un replanteo).

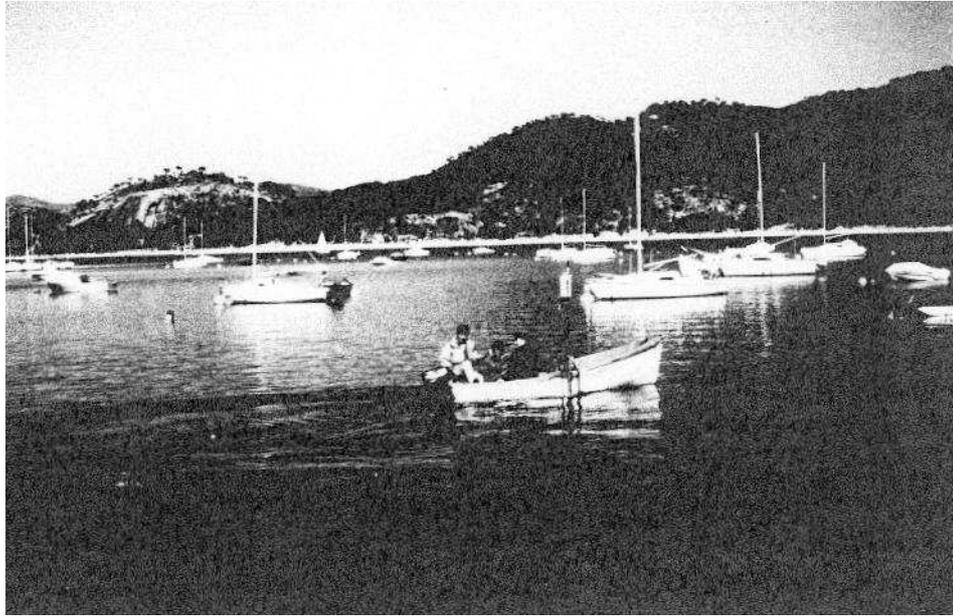


Fig. 11 Toma de datos

Se efectuó la calibración de la sonda y la medida de la cota de la superficie de agua respecto a un punto en tierra (datum), medida que se repitió al final del trabajo. A continuación se procedió a la toma de datos (Fig. 11).

Se realizaron 30 transversales (equidistantes 10 metros) y 3 longitudinales (separados 100 metros) –Fig. 12.

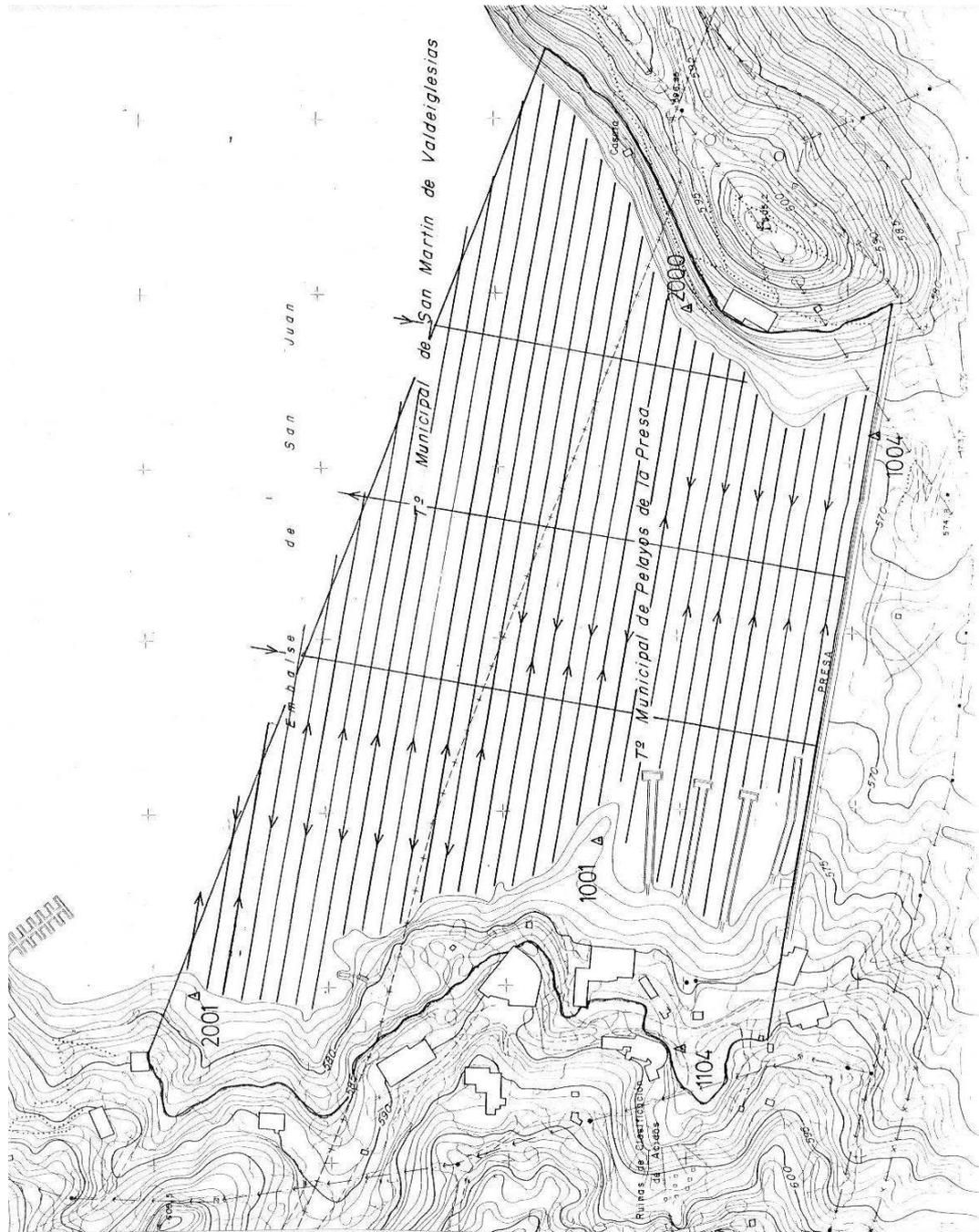


Fig. 12 Plano de planta de perfiles

Se obtuvieron las coordenadas X, Y, Z de todos los puntos en el mismo sistema de referencia, y se procedió a realizar las minutas ploteando todos los puntos. Tras el curvado se obtuvo el plano final.

La precisión obtenida fue de 12 cm en altimetría de los puntos sondados y de 15 cm de error máximo en planimetría.

5.2 LEVANTAMIENTO BATIMETRICO DEL EMBALSE DE LA CIERVA (Murcia, 1989)⁵

El objetivo del trabajo era obtener el plano batimétrico del embalse para realizar un estudio comparado del mismo con los realizados en 1971 y 1976, y analizando la geomorfología del fondo, obtener datos acerca de posibles problemas de pérdida de capacidad.

El levantamiento de 1971 se había realizado por topografía clásica y ecosonda y el de 1976 por métodos fotogramétricos y ecosonda. El proyecto que estudiamos se elaboró aplicando topografía clásica y sondeo mecánico.

Los trabajos consistieron en:

- Replanteo de los hitos que definían los perfiles en el levantamiento de 1971.
- Observación y cálculo (mediante una poligonal) para dar coordenadas a dichos hitos, con un Teodolito Sokkisha TM1 y un distanciometro RED 2L.
- Levantamiento de los perfiles elegidos (los mismos de 1971).

La determinación planimétrica se realizó por radiación con un distanciometro y un teodolito, desde los hitos a los que se habían dado coordenadas.

En las zonas poco profundas el prisma se colocó sobre un jalón de 3 metros, en las de mayor profundidad sobre un flotador, al que iba unida una cinta de 25 metros en uno de cuyos extremos se situó un peso y en el otro una polea. El operador iba embarcado en una Zodiac.

- Nivelación de los hitos y nivelación diaria de la cota de agua del embalse.
- Obtención de los perfiles.
- Análisis de datos.

Adjuntamos como ejemplo una reducción del perfil 11-9 con los datos de los tres levantamientos (Fig.13).

⁵ BERNAT PUYOL, Monserrat (1989): Proyecto Fin de Carrera "Reconocimiento batimetrico del Embalse de La Cierva". E.U.I.T. Topográfica de Madrid. Agosto.

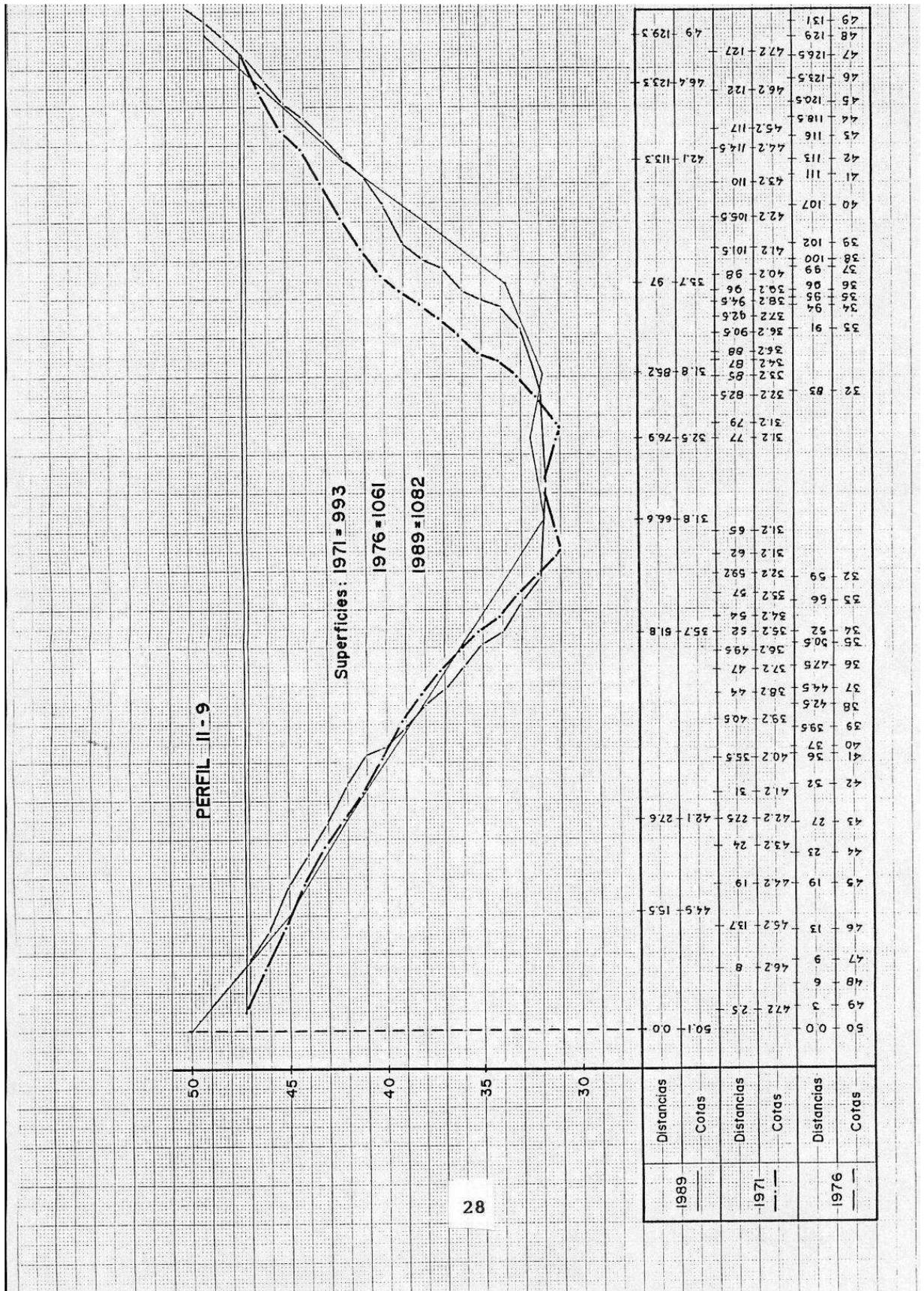


Fig. 13 Perfil batimétrico comparado

5.3 LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO DE LA PLAYA DE LA ALBUFERETA (Alicante, 1993)⁶

Este proyecto tenía como objetivo la obtención de cartografía en la Playa de la Albufereta. Para ello se utilizó una ecosonda HONEYWELL ELAC portátil modelo LAZ-721, que realiza la emisión de señales acústicas mediante un proyector/emisor sumergido en el agua.

El método de trabajo consistió en estacionar en la cabecera del perfil orientando el equipo a una referencia establecida. Los perfiles se levantaron perpendiculares a la línea de playa y paralelos entre sí. La orientación se realizó en casi todos ellos con el vértice geodésico *Alicante*.

Una vez orientado el perfil la barca se desplazaba mar adentro unos 800 metros y se le daban al operador embarcado (por medio de un equipo de radiotelefonía) las indicaciones oportunas para que entrase en alineación del perfil. Cuando le daban la orden los que estaban en tierra, ponía en funcionamiento la ecosonda en registro continuo. Cuando el operador de tierra quería registrar un punto batimétrico, lo indicaba por el radioteléfono y el operador de la sonda hacía un registro puntual que quedaba reflejado en la carta batimétrica.

El registro de la ecosonda y las lecturas de la estación total eran simultáneas. Todo punto dado tenía la X, Y registrada en la memoria interna de la estación y la coordenada Z quedaba reflejada en la carta batimétrica.

Mientras se llevaba a cabo el levantamiento se realizaba el control de la línea de agua cada 15 minutos.

Adjuntamos una copia parcial de la minuta del plano batimétrico, con el ploteado y curvado inicial de los puntos levantados (Fig.14).

⁶ GONZALEZ MANZANO, Antonio Miguel; FRANCO GIL, Armando (1993): Proyecto Fin de Carrera "Levantamiento batimétrico de la Playa de la Albufereta (Alicante)". E.U.I.T. Topográfica de Madrid.

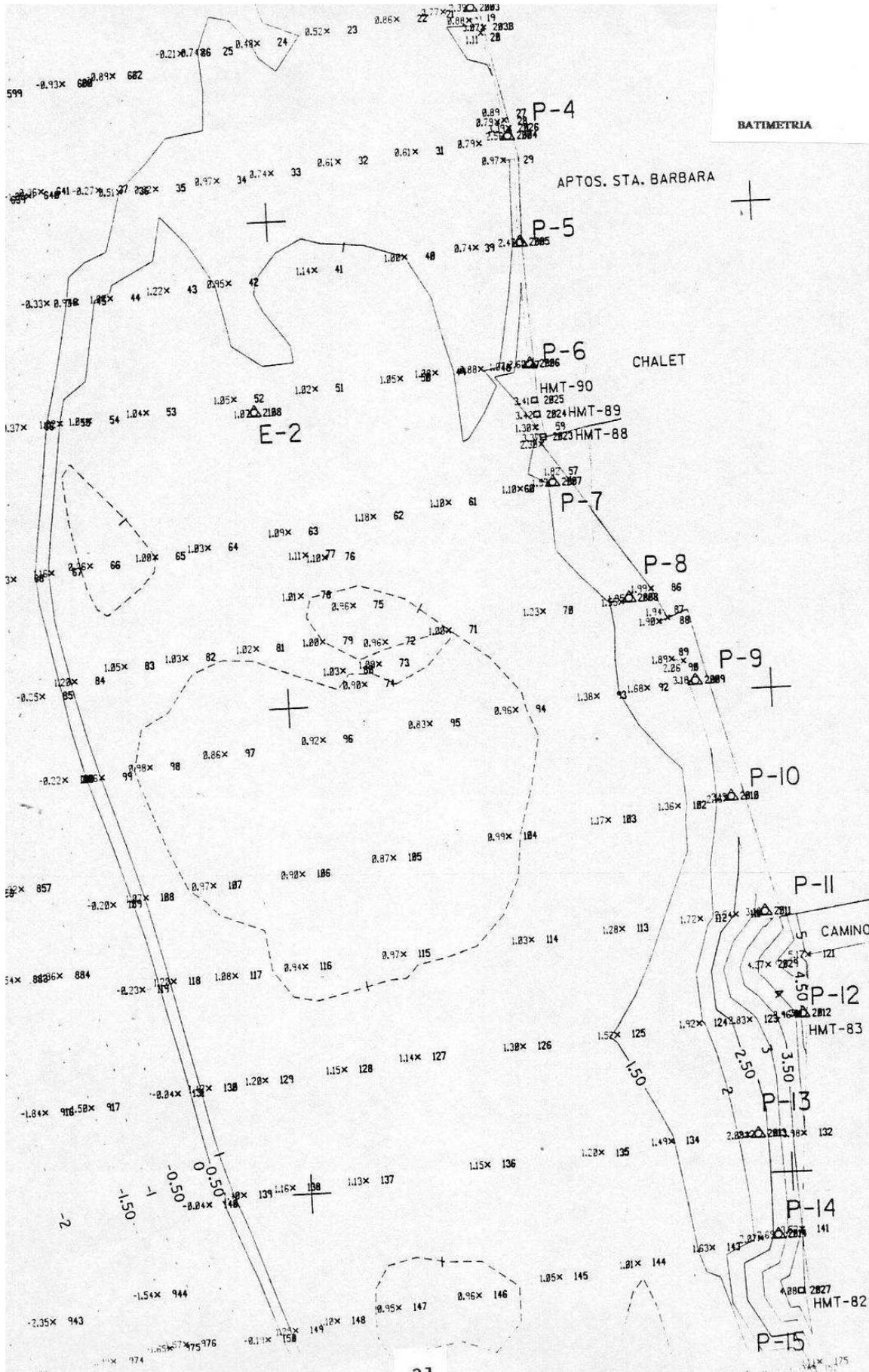


Fig. 14 Minuta del plano batimétrico de la playa

5.4 LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO DE LAS SALINAS DE TORREVIEJA CON TÉCNICAS COMBINADAS DE GPS EN TIEMPO REAL Y ECOSONDA DIGITAL MEDIANTE LA SINCRONIZACIÓN DE AMBOS SISTEMAS (1999)⁷.

El presente proyecto se realizó en las Salinas de Torrevieja, situadas a 44 km de Alicante. Las salinas tienen una extensión de unas 1400 hectáreas con un perímetro de 17 kilómetros. Su eje mayor está en dirección Norte-Sur con una longitud de unos 5,5 km. y un eje menor de 3 km. de ancho en dirección Este-Oeste. Existe un dique que coincide aproximadamente con el eje mayor y que divide la laguna en dos partes. Su contorno presenta numerosas lenguas de tierra y entrantes, siendo las más notables la Punta de la Víbora, al Este; la Isleta, al Sur, y el Puntal de Iollo, a Poniente, y de las zonas que se internan en tierra firme, las llamadas Rincón del Cerco y Rincón de Cueva Lara, al Sur; Rincón del Algarrobo, a Levante, y Hoyos de lo Reig, al NO.

El objetivo fundamental de este proyecto era la puesta en práctica de la última tecnología topográfica en aquel momento, el GPS. Para ello se trabajó en la obtención de cartografía a escala 1:2.000 y en el levantamiento de perfiles longitudinales, desarrollando un software informático capaz de sincronizar datos GPS con datos de Ecosonda.

Los equipos GPS, con los que se llevo a cabo el proyecto, fueron de la marca suiza LEICA, del modelo denominado SYSTEM 500. Este sistema cuenta con tres modalidades distintas:

- Equipos monofrecuencia con medidas de código (SR510);
- Equipos bifrecuencia con medidas de código y fase (SR520)
- Aparatos bifrecuencia con medidas de código y de fase en tiempo real (SR530).



Fig. 15 GPS modelo SR530 de la firma Leica

Este último modelo, GPS LEICA SYSTEM 500 – SR530 (Fig. 15), fue el utilizado en las diversas fases que componían el proyecto. Este equipo constaba de: Antena GPS modelo AT302; Receptor GPS SR530; Terminal TR500 y Radio Módem Satellite 2ASX.

⁷ CELADA PEREZ, Jesús (1999): *Levantamiento batimétrico de Las Salinas de Torrevieja con técnicas combinadas de GPS en tiempo real y ecosonda digital mediante la sincronización de ambos sistemas*. PFC E.U.I.T. Topografía. Madrid.

La ecosonda digital fue de la marca SIMRAD Modelo EA300P (Fig.16).



Fig. 16 Ecosonda Digital SIMRAD

Sus especificaciones técnicas son:

- Peso: 36 kg.
- Dimensiones: 42 x 46 x 56 cm.
- Frecuencia: 200 KHz.
- Duración del pulso: 0.1 – 1 milis.
- Precisión : 4-5 cm.

El resto de instrumental empleado fue:

- Palmtop Hewllet Packard (Fig.17).
- Barca de motor (Fig. 18).
- Baterías de coche 12V.
- Regleta y material topográfico común.



Fig.17 Palmtop Hewllet Packard introducido en el barco

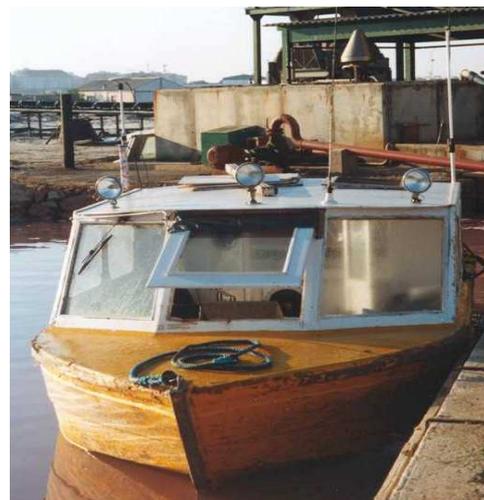


Fig. 18 Barca a la que se incorporó el equipo GPS y la ecosonda

En el proyecto se utilizaron los siguientes programas informáticos:

- SKI-PRO v 1.01: Gestor de datos GPS.

- XYNCROZ v.1.0: Sincronizador de dispositivos GPS con otros equipos como la Ecosonda. Gestor de los ficheros resultantes.
- CARTOMAP: Software gráfico para la generación de modelos digitales del terreno.
- AUTOCAD v.14, MICROSTATION, INRAIL: Potentes programas de edición gráfica, idóneos para la generación de planos a diferentes escalas, perfiles, etc.

XyncroZ es un programa desarrollado en Visual Basic v.6.0 para la sincronización de equipos GPS con datos procedentes de equipos de medición que sean capaces de recibir y almacenar mensajes NMEA procedentes de instrumentos GPS. La aplicación se preparó para la recogida, filtrado, almacenamiento y salida gráfica de los puntos, para hacer posible la sincronización de los ficheros GPS con los ficheros de datos procedentes de la Ecosonda.

FASES DEL TRABAJO

A) RED BÁSICA GEOREFERENCIADA

La necesidad de trabajar en un único sistema de coordenadas común para un determinado ámbito requiere la existencia física y permanente de una serie de puntos con coordenadas conocidas en dicho sistema (Fig. 19).

Cuando dicha red ha de estar en un sistema de coordenadas previamente establecido es necesario realizar trabajos topográficos previos para trasladar dicho sistema a la zona de trabajo. A esta fase del proyecto se la conoce como georeferenciación o enlace con un sistema de coordenadas preexistente, en nuestro caso con la geodesia, siendo los puntos conocidos previamente, en cuyo sistema de referencia se deseaban los resultados, los vértices geodésicos de la zona. De ellos se conocen sus coordenadas referidas al Datum Europeo ED-50 (Sistema ED-50), compuesto por el Punto Fundamental (Postdam), Elipsoide Internacional de Hayford y con coordenadas proyectadas cartográficamente según la proyección UTM (Universal Transversa Mercator).



Fig. 19 Vértice de la red básica

Los trabajos topográficos comenzaron con la selección de los vértices geodésicos. Se localizaron cuatro vértices: TORREJON, LOS MONTESINOS, LA VIEJA y LOS BALCONES.

Tras solicitar las reseñas y las coordenadas UTM de los cuatros vértices al Instituto Geográfico Nacional, se comprpobó que, efectivamente, los vértices se localizaban en los lugares indicados.

A continuación y a lo largo del dique central, se situaron dos bases de levantamiento (Fig. 20): BLOQUE y REF2.

La determinación y colocación de estas bases se realizó teniendo en cuenta la radio cobertura del módem (7-8 Km.), pues desde ellas se tenía previsto "radiar", por técnicas de GPS en tiempo real, la totalidad de la salina. Las bases se seleccionaron de tal forma que el dique central quedase dividido en tres zonas de longitud similar.

A continuación se visitó la totalidad de la salina y se comparó con los planos y fotografías que de ella se disponía. Se recorrió el dique central y en él se implantaron las bases planificadas. Estas se señalaron con clavos de 5 cm. de diámetro.



Fig. 20 Base BLOQUE

Ya con las bases y los vértices perfectamente materializados y reseñados (Fig. 21) comenzó la observación de los trabajos. Se estacionó uno de los equipos GPS como referencia en la base BLOQUE, y se observó un punto de referencia (*single point*) durante 45 minutos.

El equipo móvil se desplazó al primer vértice: TORREJON. Allí se estacionó el equipo, se midió la altura de la antena a la base del pilar y se puso en marcha comprobando que la recepción del módem era efectiva. Se puso en marcha el equipo con la misión de Tiempo Real, se introdujo el nombre de la estación, la altura de la antena leída más la altura del pilar y una vez inicializada la resolución de ambigüedades de forma estática, en cuestión de 30 segundos, obtuvimos las coordenadas WGS-84 de dicho vértice con precisión de $10\text{ cm} \pm 1\text{ ppm}$.

A continuación se desplazó el equipo al resto de los vértices y a la base según el siguiente orden: LOS MONTESINOS, LA VIEJA, LOS BALCONES y REF2. Resultó que en todas ellas existía radio cobertura, y tras repetir los mismos procedimientos que en el vértice anterior se pudieron calcular en tiempo real las 4 líneas-base restantes, reduciendo considerablemente el posterior cálculo en gabinete.

Al finalizar el trabajo de campo, en el terminal del equipo GPS móvil quedaron almacenados en ficheros SKI-Pro (en el trabajo previamente seleccionado) el identificador y las coordenadas WGS-84 de los cuatro vértices y de las dos bases.

El trabajo en gabinete se centró en el cálculo de unos parámetros de transformación que permitieran transformar coordenadas entre el sistema GPS y el sistema ED-50 con proyección UTM en la zona 30.

Para la obtención de estos parámetros se necesitaba un conjunto de puntos con coordenadas en sendos sistemas y un software informático con algoritmos matemáticos que comparando las coordenadas en uno y otro sistema determinase esos parámetros. Esos puntos comunes fueron los vértices geodésicos y el software empleado fue SKI-Pro.

Con el programa SKI-Pro, se creó un proyecto donde se volcaron los datos de campo anteriormente registrados. Se importaron al software SKI-Pro, como conjunto de coordenadas, un fichero en ASCII que contenía las coordenadas UTM de los vértices. Posteriormente y con el módulo "Datum-Map" del programa se eligió, como sistema GPS, el proyecto que contenía las coordenadas GPS obtenidas en campo, y como sistema local el conjunto de coordenadas UTM generado a partir del ASCII, y se procedió a calcular una transformación capaz de pasar coordenadas del sistema inicial (GPS) al sistema final (local-UTM).

La transformación seleccionada fue una transformación Clásica 3D, modelo Bursa-Wolf, con los siete parámetros como incógnita y calculada a partir de los cuatro vértices conocidos en ambos sistemas. Con cuatro vértices se tienen 12 ecuaciones (tres por vértice (X,Y,Z)), para 7 incógnitas (3 traslaciones, 3 rotaciones y un factor de escala), quedando 5 grados de libertad con posibilidad de cálculo de residuos para cada una de las incógnitas (parámetros). Los valores de los residuos nos dan una idea de la precisión de los parámetros de transformación obtenidos, y que al no superar los 2 cm., se consideraron válidos.

Ya solo quedaba crear un sistema local de coordenadas según el datum ED-50 con proyección UTM-30. Con la opción "Gestión - Sistema de Coordenadas" del programa SKI-Pro definimos el sistema local al que llamamos TORREVIEJA. Este sistema estaba compuesto de un elipsoide (Hayford), una proyección cartográfica (UTM-30) y, lo más importante, una transformación que nos permitiese pasar las coordenadas GPS que se obtuviesen en un futuro a coordenadas UTM-30, con la transformación anteriormente calculada.

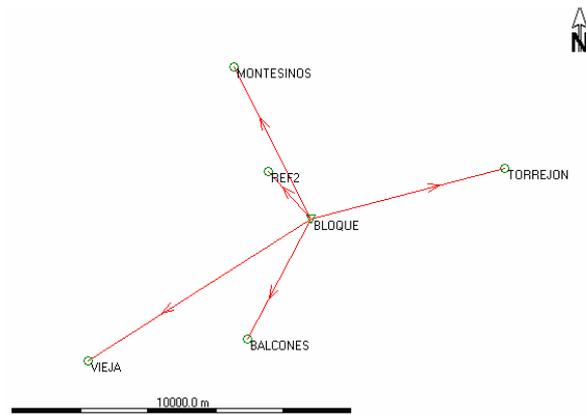


Fig. 21 Representación gráfica de la red

B) TRABAJOS DE CAMPO

Partiendo de unas bases con coordenadas conocidas en el sistema WGS-84 (BLOQUE y REF2) y un sistema local con una transformación asociada capaz de transformar las coordenadas GPS a coordenadas UTM-30, se comenzó el proceso propio del levantamiento batimétrico.

Para la planificación GPS, en este caso también se realizó un estudio de la disposición y la calidad geométrica de la constelación para los días de trabajo. Se comprobó que durante los días y las horas de trabajo la disposición de los satélites satisfacía nuestras condiciones, luego el rendimiento previsto iba a ser perfectamente viable.

Como método de trabajo se eligió el modo cinemático en tiempo real. De esta forma el propio equipo autoregistraba puntos según una condición de tiempo o distancia impuesta. Al ir conectado el GPS a la barca, e intercalado con el ecosonda, el recorrido que la nave fuese realizando se iría registrando con coordenadas (X,Y,Z,p) precisas en tiempo real.

El montaje de la ecosonda y el GPS se realizó como se observa en la figura 22.



Fig. 22 La antena GPS a estribor, antena Radio-Módem a babor.

La antena GPS y el transductor así dispuestos, eliminaban los errores producidos por posibles oleajes, pues la misma distancia vertical que recorre el transductor con el tambaleo del barco es la que recorre la el jalón con la antena GPS, haciéndolo en la misma dirección y sentido.

A babor se colocó la antena del radiomódem, lo más alto posible, pues de ella dependía la imprescindible radio cobertura que se necesitaba ininterrumpidamente.

En el interior de la cabina se conectó el equipo GPS, al puerto de entrada de datos de la Ecosonda. El puerto de salida de ésta última nos sirvió para conectar la Ecosonda al palmtop disponible (Fig. 23).

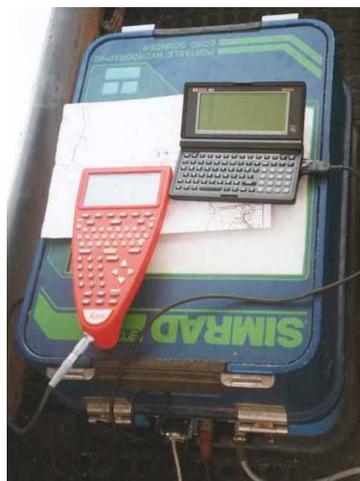


Fig. 23 Conexiones en barca

El equipo GPS contaba con sus propias batería Camcorder, mientras que la Ecosonda se alimentaba de una batería de coche que se instaló en la cubierta de la barca.

Ya estaban los tres dispositivos (Palmtop, Ecosonda y GPS) en funcionamiento y perfectamente interconectados.

Antes de iniciar cualquier trabajo, la Ecosonda tiene que tener una serie de parámetros bien definidos. De no ser así, las medidas que se obtengan con ella pueden estar falseadas. Para calibrar la Ecosonda se realizó una medida directa de la profundidad por medio de una regleta. A continuación, se leían las lecturas de profundidad que aportaba el equipo. Modificando el parámetro de velocidad de propagación, la profundidad en pantalla iba variando. Como se conocía la verdadera distancia, bastó con modificar este parámetro hasta obtener la lectura correcta. Este proceso se repetía diariamente una serie de veces.

El GPS móvil fue configurado para trabajos en tiempo real en modo cinemático y autograbado de puntos con una cadencia de un segundo. Estos puntos se identificaban por el número de serie del sensor, fecha del día de trabajo y hora de registro.

Mientras tanto la Ecosonda iba a ir midiendo profundidades que enviaba al ordenador, donde quedaban almacenadas en un fichero. Estos datos eran simples lecturas de profundidad.

La sincronización iba a permitir relacionar, mediante marcas temporales, medidas GPS (X,Y,Z) con medidas Ecosonda de profundidad (p) tomadas exactamente en el mismo instante.

Esta relación de tiempos se conseguiría si entre las medidas de la Ecosonda intercalabamos un mensaje temporal que era recibido del GPS, en definitiva un mensaje NMEA que le aporte una hora. Se podría asegurar que ambas medidas se realizaron en el mismo instante con un error de décimas de segundo, siendo ésta la precisión de la sincronización así conseguida.

En este momento comenzó el levantamiento batimétrico. Se estacionó el equipo GPS de referencia en la base BLOQUE. El tipo de misión seleccionada fue referencia en tiempo real, es decir, únicamente emitiendo correcciones.

Desde la zona de embarque, a unos 800 metros, y ya con los equipos perfectamente instalados, interconectados y sincronizados, se comprobó que el radiomódem del GPS móvil registraba los datos de corrección. Una vez fijadas las ambigüedades se comenzó la navegación.

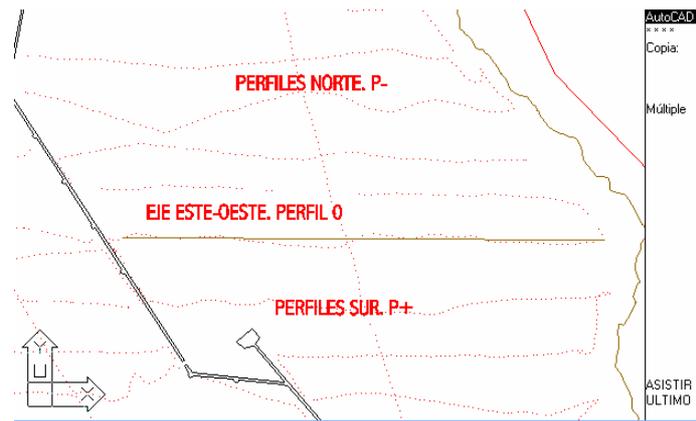


Fig.24 Eje E-0. Sentido de los perfiles. Recorrido.

Desde el extremo sur de la salina Este se comenzó el levantamiento batimétrico replanteado.



Fig. 25 Momento del control de la toma de datos.

El levantamiento total de la salina Este se realizó en 3 días, levantando 21 perfiles. Al final del segundo día se realizó una pasada transversal a los perfiles y en dirección N-S, para así comprobar los datos obtenidos días atrás, comparando profundidades y cotas en los puntos de incidencia.

La segunda salina, salina Oeste, tardó en levantarse otros tres días. El proceso empleado para el levantamiento fue exactamente el mismo que la anterior. Esta vez fueron necesarios un total de 28 perfiles y una pasada transversal que recorría prácticamente toda la salina.

El recorrido total de la barca fue de 237,425 Km. registrando datos en un desplazamiento aproximado de 62 Km, haciendo un total de 299,425 Km. totales. A una media de 6 Km./hora, el tiempo de ejecución del levantamiento fue de unas 50 horas.

C) TRABAJOS DE GABINETE

La fase de gabinete comenzó con la transformación de coordenadas GPS – UTM. Los ficheros, extraídos del GPS, contienen coordenadas de todos y cada uno de los puntos, que segundo a segundo, el equipo fue registrando. Esas coordenadas están referidas al sistema WGS-84.

Haciendo uso del programa SKI-Pro de la casa Leica, se generaron proyectos nuevos donde se incluyeron los respectivos datos de campo. El sistema local que se asoció a estos nuevos proyectos fue el sistema generado en el proceso de Georeferenciación (TORREVIEJA) que lleva una transformación asociada capaz de pasar coordenadas GPS a UTM30.

El software de sincronización empleado en gabinete fue el programa XyncroZ, cuya aplicación fue creada en su totalidad por el alumno, autor de este Proyecto Fin de Carrera. Ese software ha de ser capaz de leer, interpretar y relacionar por medio de marcas temporales, los ficheros procedentes del GPS y la Ecosonda digital, y que han de contener datos de observación exactamente comunes.

Una vez sincronizados los datos, se obtuvieron los ficheros XYZ, con coordenadas UTM-30 y cotas referidas al terreno sumergido. Se levantaron un total de 41980 puntos, divididos en dos bloques: 17790 de la salina 1-ESTE y 24190 de la salina 2-OESTE. El máximo desnivel en la salina 1 fue de 56 cm, siendo en la salina 2 de 60,6 cm.

Los errores cometidos en la medida de la posición (X,Y) dependen directamente de la precisión con la que trabaje el equipo GPS. Según las características técnicas del SR-530, este equipo da coordenadas planimétricas con precisión de $1\text{ cm} \pm 2\text{ ppm}$, que a distancias medias de 2,5 km. suponen precisiones de centímetro y medio. A la hora de sincronizar datos GPS con datos Ecosonda se debe tener en cuenta, que debido a la diferencia de ejes entre la antena GPS y el transductor, las coordenadas planimétricas asociadas al punto de profundidad medida difieren del orden del centímetro. Se debe añadir el error generado en la medida planimétrica del GPS por el oleaje y bamboleo del barco. El error aquí cometido dependerá de la altura de la antena GPS (2 metros) y la inclinación de la antena (solidaria al barco) respecto a la vertical. $\text{Error} = h_{\text{GPS}} * \text{sen } i$, que con inclinaciones máximas de un grado nos dan precisiones en torno a las 2 cm. Según esto, la precisión obtenida en planimetría fue de unos 2cm.

En altimetría, la precisión de la ecosonda es del orden de los 4 centímetros, siendo en el GPS de $2\text{ cm} \pm 2\text{ ppm}$. También se debe tener en cuenta las influencias del oleaje y el movimiento del barco. La precisión obtenida de esta forma, en valores altimétricos fue de unos 5 cm.

Los programas empleados para la elaboración cartográfica fueron: CARTOMAP, AUTOCAD, MICROSTATION e INRAIL. La escala de la representación planimétrica fue de 1/2.000.

El filtrado de puntos (debíamos tener un punto por cada centímetro cuadrado del papel, esto suponía 1 punto cada 20 metros de terreno) se realizó con el programa XyncroZ en el momento de la generación de los ficheros gráficos *.DXF. Bastó con introducir el factor de escala del plano y el propio programa generó un fichero con puntos cada 20 metros, reduciendo considerablemente la primera y extensa nube de puntos.

El número definitivo de puntos, con los cuales se obtuvo la cartografía fue de 1448 para la salina Este y 1970 para la salina Oeste, sumando un total de 3418 puntos.

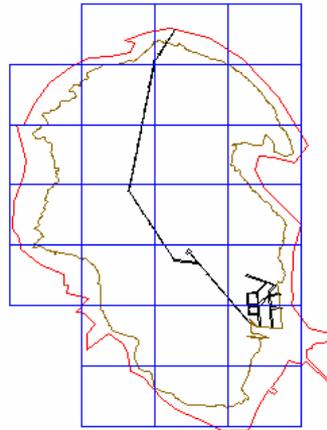


Fig. Planos resultantes.

La representación planimétrica de la salina se realizó con el programa AUTOCAD v.14. Se importó la nube de puntos, junto con el linde de la salina, el borde medio del agua y la planimetría correspondiente a las zonas terrestres.

Importamos la nube de puntos al programa MICROSTATION que junto con la aplicación INRAIL, nos facilitó un modelo digital del terreno.

Tras la edición y preparación del plano base, sobre él se realizó la cartografía a escala 1/2000, completando un total de 25 planos en hojas ISO DIN-A1.

Sobre el modelo se obtuvieron los perfiles longitudinales de la salina, calculados cada 200 metros, siguiendo aproximadamente el recorrido del barco. Se obtuvieron un total de 51 perfiles (2 de ellos longitudinales). Las escalas de éstos, fueron de 1/10 en el eje vertical (debido al pequeño desnivel medido) y 1/2.000 en el eje horizontal.

Con este proyecto fin de carrera se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Los rápidos avances tecnológicos exigen, que las técnicas y metodologías empleadas vayan actualizándose al mismo ritmo que los primeros.
- La puesta en práctica de nuevas metodologías requiere un software capaz de editar, gestionar, y almacenar los datos procedentes de los equipos empleados.
- Los nuevos equipos GPS permiten realizar levantamientos cinemáticos, con grabación continua de datos, con una característica importante: la superabundancia de datos, que hay que saber filtrar.
- La técnica de alta precisión de sincronización de datos GPS con datos Ecosonda, mejora todas las técnicas existentes en la realización de este tipo de levantamientos

- La productividad de la metodología desarrollada en este proyecto superaba con creces las perspectivas sobre el rendimiento del trabajo: en 3 días se consiguieron levantar 42.000 puntos, 1.500 hectáreas recorriendo casi 300 kilómetros, algo impensable con técnicas clásicas.
- Las posibilidades del GPS se amplían gestionando los mensajes NMEA que éste emite. Desde representaciones gráficas hasta sincronizaciones con otros aparatos, son múltiples las aplicaciones cuando se combinan y sincronizan estos equipos.

El método combinado GPS (Tiempo real) y Ecosonda digital, es la última tecnología en levantamientos batimétricos. Gracias a ella se consigue reducir considerablemente el tiempo de ejecución del trabajo, aumentando el número de puntos levantados y mejorando la precisión obtenida en cada uno de ellos hasta $10 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$.

El inconveniente que presenta este método es el rigor en la sincronización que exige la combinación de GPS en tiempo real y la Ecosonda digital. Esta alta sincronización requiere de un software informático capaz de relacionar en tiempo real o en post-proceso datos procedentes de ambos equipos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- BERNAT PUYOL, Monserrat (1989): Proyecto Fin de Carrera "Reconocimiento batimétrico del Embalse de La Cierva". E.U.I.T. Topográfica de Madrid. Agosto.
- Caturla, J.L.: Sistema de Posicionamiento Global (GPS). MOPU 1988.
- CELADA PEREZ, Jesús (1999): *Levantamiento batimétrico de Las Salinas de Torrevieja con técnicas combinadas de GPS en tiempo real y ecosonda digital mediante la sincronización de ambos sistemas*. PFC E.U.I.T. Topografía. Madrid.
- Eckels, R. : GPS Technology from Leica, Leica Australia, 1995.
- GALLARDO SANCHA, Juan; UNTE GIL, Estefanía; FERNANDEZ AGUIRREBEÑA, Agustín (1992): "Batimetría mediante sensores remotos (I)" Topografía y Cartografía. Vol. IX Nº 50, Mayo-Junio, pg 17-26. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, Madrid.
- GALLARDO SANCHA, Juan; UNTE GIL, Estefanía; FERNANDEZ AGUIRREBEÑA, Agustín (1992): "Batimetría mediante sensores remotos (y II)". Topografía y Cartografía. Vol. IX Nº 52, Sept.-Octubre, pg 68-75. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, Madrid.
- GARCIA DE QUESADA Y DE GREGORIO, J. (1974): "EL Instituto Hidrográfico de la Marina". Técnica Topográfica. Vol. II Nº 5. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, Madrid.
- GONZALEZ MANZANO, Antonio Miguel; FRANCO GIL, Armando (1993): Proyecto Fin de Carrera "Levantamiento batimétrico de la Playa de la Albufereta (Alicante)". E.U.I.T. Topográfica de Madrid.
- Hofmann-Wellenhof, B: Global Positioning System. Theory and Practice, Viena. 1992.
- Holanda Blas, M.- Bermejo, J.C.: GPS & GLONASS, Madrid,1998.
- LACHAPELLE, Gerard (1986): "Posibilidades y expectativas del Global Positioning System (GPS) para múltiples usos en mediciones marinas". Topografía y Cartografía. Nº 17, Noviembre-Diciembre, pp. 22-30. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, Madrid.
- Leick, A.: GPS Satellint Surveying, New York, 1992. Ministerio de Hacienda: Las Salinas de Torrevieja y la Mata, Madrid,1972.
- MOLERO RIESCO, Ana M^a; UCENDO GOMEZ, Alejandro; CASADO GARCÍA, Rosario Inés; GARCIA GARCIA, Jose Manuel (1991): Proyecto Fin de Carrera "Levantamiento batimétrico del Embalse de S. Juan". E.U.I.T. Topográfica de Madrid. Marzo.
- NUCHE BENITO, Francisco (1974): "La Hidrografía Española". Técnica Topográfica. Vol. II Nº 5, pp. 52-64. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, Madrid.
- Nuñez-García del Pozo, A.- Valbuena Durán, J.L. – Velasco Gómez,J.: GPS: La Nueva Era de la Topografía, Madrid, 1992.

- PEÑAFIEL, J.; ZAYAS, J (1996): *Aplicación de las técnicas de medición GPS en Tiempo Real con Precisión centimétrica a Levantamiento Batimétrico*, MAPPING.
- SMITH, Scot E. & McCORD, Mark R. (1989): "Ocean-Current Mapping: A Historical Review and Preview of the Future". Surveying and Mapping. Vol. 49 N° 4, pp 189-194.
- VIDAL MASSO, Fernando (1974): "La automatización en Hidrografía". Técnica Topográfica. Vol. II N° 5. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, Madrid.

DIRECCIONES DE INTERNET

http://192.5.41.239/gps_datafiles.html

<http://www.cnde.iastate.edu/gps.html>

<http://www.arrakis.es/~akar/index.htm>

<http://www.geo.ign.es/servidor/geod/record/rtdgps.html>

<http://www.mercator.org/>

<http://ribera.tel.uva.es/~jpozdom/telecomunicaciones/portadagps.htm>

<http://www.leica-gps.com/>

<http://www.corevia.com/~dioptra/indice.htm>

<http://www.retopo.com/paginas/index.htm>