

4.- Estudios experimentales

4.1.- Introducción

En este capítulo se presentan algunos antecedentes de estudios experimentales de procesos hidrodinámicos y morfodinámicos en la zona cercana a la costa, llevadas a cabo por distintas universidades e instituciones de investigación alrededor del mundo, Se ha puesto especial énfasis en la descripción de los estudios experimentales en los que se ha trabajado en esta tesis, llevados a cabo dentro del marco de dos proyectos de investigación financiados por la Unión Europea:

- FANS (MAST3-CT95-0037) del programa MAST de la UE, CIIRC, y DGICYT (CE94-0022) del MEC, realizada conjuntamente por instituciones españolas y rusas: el Laboratori d'Enginyeria Marítima de la Universitat Politècnica de Catalunya, el Centro Internacional para la Investigación de los Recursos Costeros, el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (Madrid), el Instituto Oceanográfico Gelendzik y el Instituto Oceanográfico Shirshov, ambos de la Academia de Ciencias de Rusia y el Departamento de Física Aplicada de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- COAST 3D (MAST3-CT97-0086) del programa MAST de la UE, realizada en conjunto con HR Wallingford (UK), Universidad de Utrecht (NL), Rijkswaterstaat – National Institute for Coastal and Marine Management (NL), Universidad de Plymouth (UK), el Proudman Oceanographic Institute (UK), Universidad de Caen (FR), la Naval Postgraduate School, Monterrey (EUA) y la Oregon State University (EUA).

La campaña DELTA'96 (Proyecto FANS) es la continuación de los proyectos de investigación en hidromorfodinámica en la zona cercana a la costa, iniciados por el LIM-UPC hace aproximadamente 10 años. DELTA'96 ha tenido innovaciones importantes con respecto a los experimentos previos DELTA'93 (ver Rodríguez *et al.* 1994 y 1995a) y tiene como objetivos fundamentales el estudio y obtención de datos de alta calidad y resolución 3D de procesos hidrodinámicos a las escalas de Macroturbulencia, Oleaje de Viento, Ondas Largas y Corrientes, y el Transporte de Sedimentos en suspensión en la zona cercana a la costa -incluyendo la zona de rompientes-. Con la obtención de estos datos se podrán calibrar distintos modelos numéricos avanzados que permitan simular la hidrodinámica, la propagación de oleaje irregular y la circulación Q3D en el dominio de estudio. Este trabajo forma parte de los experimentos de mayor escala del proyecto FANS (Flow Across Narrow Shelves “The Ebro Delta Case”) de la Unión Europea, los cuales incluyen medidas en un dominio más extenso del Mediterráneo Occidental, cubriendo un área de 75x50 km, desde el sur de Cabo Salou pasando por el Delta del Ebro, hasta las Islas Columbretes (como se muestra en la figura 4.1), incluyendo varios subdominios a través de la plataforma

(Inner Shelf, Shoreface/Surf Zone). El objetivo general de FANS es estudiar los flujos de energía, agua, sedimentos y nutrientes a través de la plataforma.

El CEDEX ha llevado a cabo hasta la fecha, varios estudios sobre la evolución costera del Delta del Ebro. En 1993 estableció un convenio con la Dirección General de Costas (que en la actualidad pertenece a la Secretaría de Estado del Agua del Ministerio de Medio Ambiente) para analizar la situación del Delta del Ebro en el estudio “Dinámica litoral del Delta del Ebro y prognosis de su evolución: recopilación y análisis de los trabajos sobre el Delta del Ebro”. Durante la ejecución de dichos trabajos se han recopilado datos de campo, realizándose varios tipos de trabajos, seminarios y mesas redondas tendientes a llegar a definir la situación y su posible evolución con un horizonte establecido en el año 2020. Para realizar este trabajo, el CEDEX ha recibido la cooperación de varias instituciones españolas, entre las que se pueden citar el Instituto Geológico y Minero de España, la fundación Agustín de Bethencourt, La Universitat Politècnica de Catalunya, la Dirección General de Obras Hidráulicas y el Centro de Estudios Hidrográficos y el Centro de Estudios de Puertos y Costas (estos dos últimos son organismos que pertenecen al mismo CEDEX).

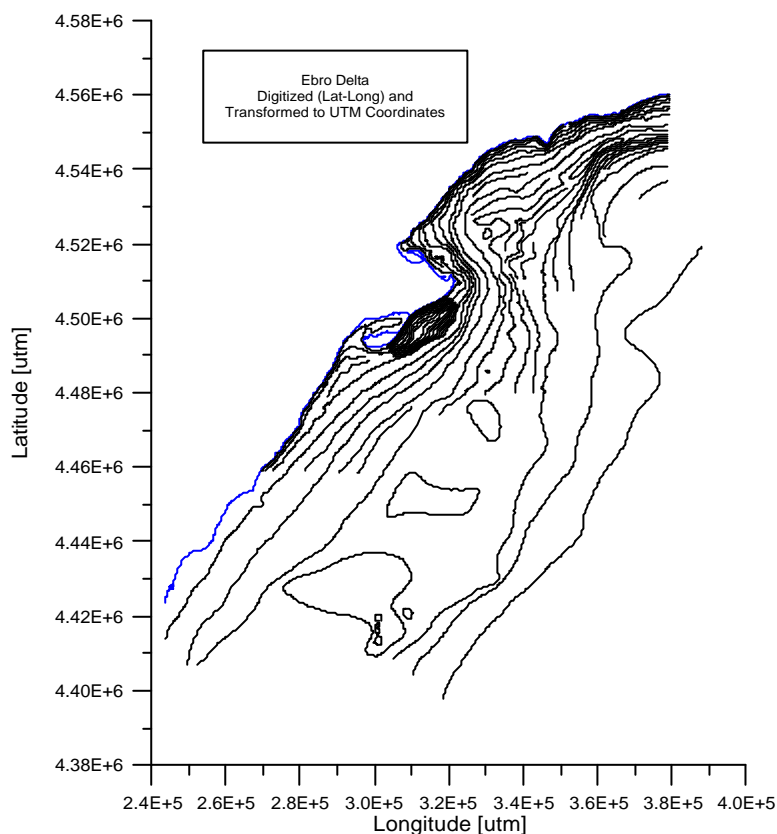


Figura 4.1.- Dominio de Estudio del Proyecto FANS

Durante los experimentos se midieron simultáneamente numerosas variables de distinto tipo, con el fin de tener una idea lo más general y precisa posible de las condiciones hidrodinámicas que se dan en respuesta de los agentes meteorológicos (oleaje, viento, marea, corrientes), así como batimetría, evolución de los perfiles de playa, concentraciones de sedimentos en suspensión y transporte medio. Se han podido

identificar patrones de circulación complejos, con superposición de estructuras típicas inducidas por el viento con corrientes debidas a la rotura del oleaje (corrientes longitudinales y de resaca suaves).

Por su parte, las campañas llevadas a cabo dentro del proyecto COAST3D se han enfocado en el estudio de los procesos morfodinámicos, con el fin de obtener información detallada y de alta calidad en 2 playas distintas, una con un fuerte carácter 3D (Teignmouth, UK) y una playa mas longitudinalmente uniforme, con carácter 2.5D (Egmond, NL). El trabajo realizado en la presente tesina se basa principalmente en el análisis y modelado de la playa de Egmond, y en menor medida, de la playa de Teignmouth.

Este capítulo también incluye una breve recopilación de antecedentes experimentales en laboratorio y campo, así como una descripción conceptual de los procesos físicos en la zona de rompientes (como justificación de los propios experimentos). En la sección 4.2 se presentan algunos antecedentes de otras campañas de campo llevadas a cabo para obtener datos hidrodinámicos en el litoral. En la sección 4.3 se presenta una descripción detallada de la campaña Delta'93 que antecedió a Delta'96. En la sección 4.4 se presenta el diseño de los experimentos y la metodología del post-proceso general de los datos obtenidos. En la sección 4.5 se describen las campañas llevadas a cabo dentro del marco del Proyecto COAST 3D (con especial énfasis en la playa de Egmond aan Zee).

4.1.1.- Motivación

La zona costera siempre ha sido de interés para el hombre. Se cree que actualmente entre el 65 y 70% de la población mundial vive en una franja muy estrecha de la zona costera. Por lo tanto, las playas y los estuarios se han visto sometidos a una gran presión antropogénica, además de a una explotación excesiva de los recursos naturales. Así pues, existe la necesidad intrínseca de conocer, estudiar y proteger la zona costera. En muchos casos, esta protección se realiza por medio de construcción de diversos tipos de “obras costeras”, que van desde la construcción de diques a los rellenos artificiales de playa. En la gran mayoría de los casos, estas actuaciones representan una alteración del equilibrio natural de la playa. Por lo tanto, desde el punto de vista de la Ingeniería de Costas, para la solución de numerosos problemas costeros, es necesario conocer y describir en detalle y cuantitativamente las condiciones hidrodinámicas de la zona costera y su impacto en la línea de costa, así como su repercusión medio-ambiental.

4.1.2.- Procesos hidro-morfodinámicos en la zona cercana a la costa

Las playas arenosas (y la presencia de barras de arena) son características de muchas de las zonas costeras de todo el mundo y su comportamiento (procesos físicos) puede ser estudiado en diferentes escalas espaciales y. Estas escalas varían, desde las interacciones grano-grano en algunos segundos, hasta la evolución de la línea de la costa a lo largo de siglos. El comportamiento de las costas arenosas tiene que ver con la dinámica de sus rasgos morfológicos y su respuesta puede verse reflejada en los desplazamientos de la línea de la costa.

En el caso de los sistemas costeros, su comportamiento está relacionado con la hidrodinámica, que es el mecanismo impulsor del transporte de sedimentos y los cambios en la morfología litoral. Los factores que controlan la hidro-morfodinámica son las interacciones y relaciones entre los flujos, ciclos y transformaciones de energía y materia (derivadas básicamente a partir del fenómeno de rotura del oleaje y corrientes generadas por viento y mareas). Las adaptaciones mutuas de la hidrodinámica, el transporte de sedimentos, la morfología y las condiciones ambientales es lo que se llama hidro-morfodinámica. En un ambiente costero, la hidrodinámica induce el transporte de sedimento y éste los cambios morfológicos. Esta morfología cambiante influencia de nuevo e interactúa con la hidrodinámica y el resultado es otra respuesta diferente del transporte de sedimentos, dando lugar a una nueva adaptación morfológica a estas “nuevas” condiciones. En este aspecto es importante recalcar dos cosas; la primera es que las relaciones entre todos los factores que interactúan en la zona cercana a la costa son no lineales por lo que en ocasiones, para que haya movimiento de sedimento, alguna variable hidrodinámica debe exceder un cierto valor umbral (crítico) para que el transporte de sedimentos pueda inducir algún cambio morfológico. La segunda es que, por lo general, habrá un lapso de tiempo para que haya una respuesta morfológica a las condiciones hidrodinámicas iniciales. De esto último se desprende que exista un intervalo de tiempo definido como de reacción o respuesta, que es el intervalo entre las variaciones en la hidrodinámica y la respuesta morfológica de la costa. De la misma manera, hay un periodo de relajación que está en función de la intensidad de la hidrodinámica y el volumen de sedimento involucrado en los cambios morfológicos, y que está definido como el intervalo de tiempo en el que se producen los cambios en la morfología hasta que ésta se ajusta del todo a la hidrodinámica.

La hidrodinámica en la zona cercana a la costa es el mecanismo impulsor de los procesos de transporte de sedimentos, lo que trae como resultado los cambios en la morfología. Muchos de los aspectos de la hidrodinámica, como los mecanismos de movimiento del fluido al paso de las olas, y su influencia en los flujos de transporte de sedimentos, aún no están plenamente comprendidos.

En general, la hidrodinámica de la zona cercana a la costa es altamente variable, espacial y temporalmente hablando. La mayoría de los procesos involucrados están relacionados con el oleaje incidente generado en aguas profundas. Las transformaciones del oleaje incidente en aguas intermedias y someras son provocadas por los efectos conocidos como *shoaling*, refracción, difracción y rotura del oleaje. Todos estos procesos dan como resultado diferentes movimientos de agua a distintas escalas. Algunos de estos movimientos influyen de una manera importante los mecanismos de suspensión de sedimentos o dispersión de contaminantes: a pequeña escala, la turbulencia debida a la rotura del oleaje o a mayor escala las oscilaciones de baja frecuencia y las corrientes inducidas por la rotura del oleaje (Battjes, 1988). Las corrientes en la zona cercana a la costa interactúan además con el oleaje generando una estructura tridimensional muy compleja. Se generan corrientes longitudinales inducidas por el oleaje en rotura al haber flujo de momentum -tensor de radiación- (Komar & Oltman-Shay 1990) así como corrientes transversales, conocidas como *undertow* o de resaca (Stive, 1988). Otros procesos que influyen la hidrodinámica en la zona cercana a la costa son las mareas (y las corrientes asociadas a ellas) y las corrientes longitudinales a la costa inducidas por viento. Las corrientes generadas por la marea en ambientes micromareales (como en el caso del Delta del Ebro), no tienen especial

importancia dentro de la zona cercana a la costa, mientras que las corrientes inducidas por viento pueden ser más pronunciadas dentro de la zona cercana a la costa en zonas de poca profundidad.

En este estudio (campana Delta'96), se han medido distintos parámetros de la hidromorfodinámica que son importantes en los procesos de transporte de sedimentos y dispersión de contaminantes en la zona cercana a la costa, así como distintas variables meteorológicas. La relación de las mediciones efectuadas y obtención de parámetros asociados es la siguiente:

- i.* Medidas de velocidades hidrodinámicas en la zona cercana a la costa y en la zona de rompientes.
 - a. Variables estadísticas de las series de velocidades.
 - b. Valores medios de la corriente longitudinal a la costa.
 - c. Valores medios de la corriente perpendicular a la costa.
 - d. Perfiles de corriente en la columna de agua (identificación de la estructura 3D de la corriente).
- ii.* Medidas de oleaje en la zona cercana a la costa y en la zona de rompientes.
 - a. Espectros del oleaje incidente.
 - b. Series de tiempo de la superficie libre y velocidades del flujo oscilatorio.
 - c. Identificación de ondas de baja frecuencia.
 - d. Cuantificación de la descomposición de frecuencias del oleaje en la zona cercana a la costa.
- iii.* Medidas de concentraciones de sedimento relacionadas con la rotura del oleaje.
- iv.* Medidas de transporte de sedimento en suspensión en la zona de rompientes.
- v.* Medidas topo-batimétricas en la zona cercana a la costa y en la zona de rompientes.
- vi.* Medidas de variables meteorológicas.
 - a. Velocidad y Dirección del viento.
 - b. Presión atmosférica.
- vii.* Filmaciones de la dispersión de manchas de fluoresceína en la zona de rompientes.
 - a. Filmación de la evolución de manchas vertidas en la zona de rompientes.

4.2.- Antecedentes de estudios experimentales hidro-morfodinámicos en la zona cercana a la costa

A continuación se presentan algunas de las características principales de los experimentos de campo centrados en estudios hidro-morfodinámicos llevados a cabo por en diversos países.

4.2.1.- Campañas Británicas

Los principales experimentos británicos fueron realizados en el marco del programa B-BAND *British Beach and Nearshore Dynamics* (Russell *et al.*, 1991; Foote *et al.*, 1992 y Davidson *et al.*, 1992), en los cuales participaron la Universidad de Gales, la Universidad de Plymouth, la Universidad de Hull y el Natural and Environmental Research Council (RU-NERC). El programa tuvo una duración de tres años (1990/93) y el principal objetivo de este programa fue mejorar el conocimiento de la dinámica de la zona de rompientes incluyendo hidrodinámica, morfodinámica y las respuestas de la playa, realizando los experimentos en varias playas macromareales con características distintas, entre las que destacan:

- i. Langennith (playa disipativa).
- ii. Spurn Head (intermedia).
- iii. Teignmouth (playa reflexiva).

Existen numerosas campañas británicas que no ha sido tan completas como las B-BAND pero que son de interés.

Playa de Saunton, Devon (Huntley & Bowen, 1974). Esta fue una de las primeras en que se midió específicamente la hidrodinámica dentro de la zona de rompientes. Se hicieron medidas en uno y tres puntos con correntímetros electromagnéticos a 0.2 m y 0.4 m del fondo respectivamente, usando 3 trípodes con un correntímetros electromagnéticos y un sensor de presión cada uno. En un punto llegaron a cubrir un transecto de 120 m gracias a la carrera de marea.

Pendine-Carmarthen (Jago & Hardisty, 1984) realizada en 1968 y 1970, durante 1 mes en la playa Pendine Sands, en la bahía de Carmarthen. Se realizaron medidas conjuntas de batimetría, olas, corrientes y transporte de sedimentos.

Maplin Sands, Estuario del Támesis (Owen & Thorn, 1978; Soulsby, 1988), llevada a cabo por HR Wallingford, de 1973 a 1975. Se realizaron medidas conjuntas de batimetría, olas, corrientes, mareas, transporte y características de sedimentos.

Boscombe Pier (Owen & Thorn, 1978, Soulsby, 1988), llevada a cabo por HR Wallingford durante 1977 y 1978. Se realizaron medidas conjuntas de olas, corrientes, mareas, transporte y características de sedimentos.

Isla de Wight (Stable): (Humphery, 1987 y Soulsby, 1988) llevada a cabo del 11 al 24 Octubre de 1986 por el Proudman Oceanographic Laboratory y HR Wallingford en la playa Stable, bahía Freshwater, en la isla de Wight. Las mediciones se realizaron con un sistema integrado denominado STABLE (Soulsby, 1988).

4.2.2.- Campañas Canadienses

Llevadas a cabo dentro de la Bahía de Nottawasaga (Greenwood & Sherman, 1984; Bauer & Greenwood, 1990 y Greenwood, Osborne & Bowen, 1991) por la Universidad

de Toronto, Universidad de Dalhousie y C-COAST (Canadian Coastal Sediment Transport Programme) de mayo a junio de 1980, junio de 1986 y 1987/88. La mayoría de las mediciones analizadas se realizaron en la Bahía de Nottawasaga, Ontario, en playas micromareales. Los objetivos principales de dichas campañas fue medir las características del oleaje y las corrientes longitudinales inducidas en la zona de rompientes; la identificación y medición de la estructura vertical del flujo transversal a la costa (*undertow*) y sus mecanismos impulsores (*wave setup*), relacionándolos con la batimetría y estudiar el papel del flujo oscilatorio y las corrientes en el transporte transversal de sedimentos.

Otras campañas canadienses de interés son:

Bahía Kouchibouguac (Greenwood & Mittler, 1984), llevada a cabo en 1978 por la Universidad de Toronto en la Bahía Kouchibouguac, New Brunswick. Se realizaron medidas conjuntas de batimetría, olas, corrientes, transporte de sedimentos y meteorología.

Pointe Spain, New Brunswick (Bowen *et al.*, 1986; Willis, 1987), llevada a cabo en 1983 por la Canadian Coastal Sediment Study (CCSS-NERC). Se realizaron mediciones conjuntas de meteorología, batimetría, olas, corrientes, mareas, transporte y características de los sedimentos.

Stanhope Lane, Prince Edward Island (Bowen *et al.*, 1986; Willis, 1987) llevada a cabo en 1984 por la CCSS-NERC. Se realizaron mediciones conjuntas de batimetría, olas, corrientes, transporte y características de los sedimentos.

Queensland Beach, Bahía de Sta. Margarita, Nueva Escocia (Greenwood *et al.*, 1990), llevada a cabo por C-COAST. Se realizaron mediciones conjuntas de olas, corrientes, mareas y transporte de sedimentos.

Stanhope Lane, Prince Edward Island (Van Hardenberg *et al.*, 1991), llevada a cabo por C-COAST en 1989. Se realizaron mediciones conjuntas de olas, corrientes, mareas y transporte de sedimentos.

Queensland Beach, Bahía de Sta. Margarita, Nueva Escocia (Vincent *et al.*, 1991) en la playa de Queensland. Se realizaron mediciones conjuntas de olas, corrientes y transporte de sedimentos.

4.2.3.- Campañas Españolas

Estuario de Suances, Cantabria (Losada *et al.*, 1994). Esta campaña es el primer antecedente publicado de campañas de campo que incluye la zona de rompientes en el litoral español. Llevada a cabo durante Noviembre de 1991 por la Universidad de Cantabria y el Instituto de Estudio Marinos de Plymouth. En este experimento participó también personal del LIM-UPC con el objeto de adquirir experiencia en este tipo de campañas. El principal objetivo de dicha campaña fue estudiar la interacción de olas y corrientes en la desembocadura del río Besaya.

Otras campañas españolas de interés son:

El Saler (e.g. Medina & Serra., 1993). Campaña realizada en la zona cercana a la costa, en “El Saler” (Valencia), por el CEPYC-CEDEX en las costas de Valencia en el marco del proyecto MAST II-G8M.

Delta'93 (Rodriguez *et al.*, 1995, Ortiz *et al.*, 1995). Campaña llevada a cabo por el Laboratori d'Enginyeria Marítima en la barra del Trabucador en el hemidelta sur del Delta del Ebro en diciembre de 1993. Más adelante se presentará una descripción detallada de esta campaña.

4.2.4.- Campañas Holandesas

Egmond (e.g. Derks, 1982-84; Derks & Stive, 1984; Reinalda, 1988; De Vriend *et al.*, 1988) llevada a cabo en Mayo y Junio de 1981, y de Septiembre de 1982 a Enero de 1983 por TOW, Rijkswaterstaat (Depto. de Obras Públicas), Universidad Tecnológica de Delft y Delft Hydraulics en la costa de Egmond, Mar del Norte. Los objetivos de esta campaña fueron obtener datos de oleaje, corrientes y transporte de sedimentos para estudiar la hidrodinámica y morfodinámica costera de una playa longitudinalmente uniforme; analizar el funcionamiento de distintos sensores de oleaje, niveles, corrientes y transporte sólido, dentro y fuera de la zona de rompientes bajo distintas condiciones; verificar el funcionamiento del sistema de adquisición y análisis de datos *in situ* así como la logística empleada y finalmente la obtención de experiencia en campañas de medidas. Se realizaron mediciones tanto en condiciones de calma (primera fase en 1981) como de temporal (segunda fase en 1982/83) de elevaciones de la superficie libre, niveles medios, velocidades instantáneas dentro de la zona de rompientes, velocidades medias fuera de la zona de rompientes, concentraciones de arena en suspensión dentro de la zona de rompientes, topografía, granulometría, viento, temperatura del agua y dirección del oleaje.

Básicamente hay dos tipos de resultados en estas campañas. Por un lado los referidos a la metodología empleada y por otro el análisis de los datos medidos. En este punto, el interés está centrado principalmente en la metodología y técnicas experimentales empleadas. Los referidos al análisis de fenómenos físicos se pueden ver en los trabajos sobre propagación de oleaje de Battjes & Stive (1984), características de velocidades de baja frecuencia por Gerritsen & van Heteren (1984), corrientes inducidas por olas y transporte de sedimentos por Boer *et al.* (1984) ó cinemática y direcciones del oleaje por Battjes & van Heteren (1984).

Información adicional sobre estas campañas se puede consultar en los trabajos de Derks & Stive (1984), de Vriend *et al.* (1988) y Reinalda (1988).

Otras campañas holandesas de interés son:

Egmond (Kroon, 1991; Van Rijn & Kroon, 1992; y Kroon, 1994), realizados cerca de la misma playa de Egmond por la Universidad de Utrech durante Octubre y Noviembre de 1990 (Kroon, 1994). Si bien estos experimentos estuvieron centrados en los aspectos morfodinámicos más que en la hidrodinámica, se midieron olas y corrientes dentro de la zona de rompientes analizándose las propiedades del flujo oscilatorio y de las ondas de baja frecuencia con miras a su influencia en el transporte de sedimentos.

Eastern Sheldt (Van Rijn, 1991), llevados a cabo en 1983 por la institución VESSEM en un transecto del estuario de Eastern Sheldt (Holanda). Se realizaron conjuntamente mediciones de olas, corrientes, transporte y características de sedimentos.

4.2.5.- Campañas Japonesas

Además de los EEUU, Japón es uno de los países que más esfuerzos ha realizado en campañas de medidas costeras. Las primeras campañas se remontan a principios de la segunda mitad del siglo XX (Ishara *et al.*, 1958, Sato & Tanaka, 1966). Las principales campañas japonesas son:

Ajigaura y Oarai (Sasaki & Horikawa, 1978; Horikawa & Hattori, 1987; Kraus *et al.*, 1981; Uda & Hashimoto, 1983, y Watanabe, 1988) llevadas a cabo en las playas de Ajigaura y Oarai por varios institutos públicos de Japón, entre los que destaca el Japanese Nearshore Environment Research Centre (NERC). Participaron también las Universidades de Tokyo, Chuo, Yokohama, Metropolitana de Tokyo, Tsukuba y Tohoku. Las campañas fueron realizadas en el periodo 1978-1984, con 6 series de 2 a 4 semanas cada una. Dichas campañas se centraron en la medición conjunta de oleaje (con sensores, filmación y fotogrametría), corrientes (correntímetros y trazadores lagrangianos), transporte de sedimentos (sensores y trazadores), evolución del fondo y condiciones meteorológicas.

NERC, Ajigaura 78-79; NERC, Shimokita; Hirono & Oarai 80-82 (Sasaki *et al.*, 1976; Kraus *et al.*, 1982), llevadas a cabo en las playas de Ajigaura (78-79) y Ajigaura, Shimokita, Hirono & Oarai (80-82), en la costa de Ibaraki, al norte de Japón en el océano Pacífico. Participaron diversas instituciones como INA Co., University of Tokyo, Tokyo Metropolitan University; Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Science Research Foundation of Ministry of Education, Yokohama University, NERC (1978-1982).

Ogata (Kawata *et al.*, 1990), llevada a cabo en 1988/89 y 90, durante los meses de invierno por la Universidad de Kyoto en la costa de Lioka, en una playa de arena con numerosas obras (diques perpendiculares y paralelos a la playa) e intensa actividad morfodinámica natural y artificial. Se realizaron mediciones conjuntas de batimetría, oleaje, corrientes, características y transporte de sedimentos (trazadores fluorescentes).

HORF - Kashima (Nadaoka *et al.*, 1988; Nakamura & Katoh, 1992 y Kuriyama & Ozaki, 1993) llevada a cabo en la playa de Kashima durante los periodos del 12-26 de Septiembre de 1988 (a); del 13-31 de Julio de 1989 (b); del 9-28 de febrero de 1990 (c) y del 25 Junio - 10 de Julio de 1990 (d) por el Hazaki Oceanographical Research Facility (HORF) y el Port and Harbour Research Institute. Las medidas se realizaron

cerca de la línea de rotura bajo diversas condiciones de oleaje y en medio de la zona de rompientes bajo condiciones de temporal. Se observaron adicionalmente propiedades del oleaje en rotura como: fracción de olas rotas, posición de la línea de rotura y tipo de rotura. Las corrientes se midieron con un correntímetro electromagnético en cada punto de medida coincidiendo con los sensores de olas. También se realizaron numerosas mediciones con trazadores (boyas lastradas) a lo largo del muelle.

Otras campañas japonesas de interés son:

Naka (Greenwood & Mittler, 1984), llevada a cabo en el periodo 1980-1981 por la Universidad de Toronto (Canadá) en la playa Naka, costa de Ibaraki. Se realizaron mediciones conjuntas de batimetría, olas, corrientes, y transporte de sedimentos.

Lioka (Uda *et al.*, 1991) llevada a cabo en 1987 durante 7 meses en la costa de Lioka, en una playa de arena con numerosas obras (diques perpendiculares y paralelos a la playa) e intensa actividad morfodinámica natural y artificial. Se realizaron mediciones conjuntas de batimetría, de oleaje y corrientes (medidas en las mismas posiciones). También se realizaron medidas de las características y el transporte de sedimentos (con trazadores fluorescentes).

Ehime - Bashinji (Ifuku & Kakinuma, 1982) llevada a cabo por la Universidad de Ehime en (a) 1978 durante 7 días en las playas Chuyo, Akita, Hiezu, Nishikinohama y Takahama (siendo la primera una playa rocosa y las 4 restantes de arena) y (b) durante 3 meses cada vez en los años 1982 y 1984 en dos transectos de la costa de Ehime, Playa Bashinji (Ifuku & Kakinuma, 1988). Se realizaron medidas conjuntas de batimetría, oleaje, características de los sedimentos y formas de fondo con hidrocámaras. Los experimentos del 1978 estuvieron orientados al estudio de la rugosidad de fondo bajo olas sin rotura, mientras que en los de 1982 y 1984, se midió conjuntamente batimetría, oleaje, corrientes, mareas, transporte y características de sedimentos.

4.2.6.- Campañas Norteamericanas

Estados Unidos es un país con larga tradición en medidas en zonas costeras. Los primeros intentos conocidos de medir la hidrodinámica en zona de rompientes son los realizados por el Scripps Institute of Oceanography de San Diego en las playas de California en 1936 y 1937, continuados por Caldwell (1956) en la Bahía Anaheim, California y Moore & Cole (1960) que midieron en Cabo Thompson, Alaska.

Dorrestein (1960) llevó a cabo una campaña en Playa Fernandina, en las costas de Florida, utilizando un muelle transversal para registrar el oleaje incidente y niveles del mar a través de la zona de rompientes para medir el *setup* inducido por el oleaje.

Ingle (1966) midió la distribución transversal de la corriente longitudinal, la batimetría, características del oleaje incidente y niveles a través de la zona de rompientes en la playa *Trancas* en las costas de California (Ingle, 1966; Thornton, 1970).

Posteriormente comenzaron a llevarse a cabo campañas de mayor importancia, entre las que destacan las siguientes:

La Jolla 1.- Torrey Pines (Guza & Thornton, 1978; Thornton, 1979), llevada a cabo por la US Office of Naval Research, Jet Propulsion Laboratory, Naval Postgraduate School (Monterrey) y Scripps Institute of Oceanography (La Jolla) en marzo de 1977 en la Playa *Torrey Pines* en La Jolla, California. Se trata de una playa longitudinalmente uniforme con efectos de marea (rango de 2 m), arena con $d_{50} = 0.1$ mm, rotura tipo *spilling* y pendientes entre 1:40 y 1:150. Se midieron corrientes longitudinales, oleaje y batimetría. A pesar de que esta campaña fue relativamente pequeña (frente a las de mayor envergadura descritas más adelante) se obtuvieron algunas conclusiones interesantes, que además permitieron acumular experiencia para los experimentos de gran escala. Por ejemplo, se puso de manifiesto la alta variabilidad espacial y temporal que suelen presentar las corrientes longitudinales, lo cual obliga a disponer de un alto número de sensores para obtener una descripción fiable de la estructura hidrodinámica.

La Jolla (2) y (3): llevadas a cabo por el California Department of Boating and Waterways y el Scripps Institute of Oceanography en la Playa Scripps, cercana a La Jolla, California, durante varios días en Marzo de 1990 (Flick & George, 1990) y durante una semana en Marzo y Abril de 1992. Se midieron niveles, olas y velocidades con alta resolución temporal y espacial (George *et al.*, 1994). Se realizaron medidas de velocidades, niveles y temperatura mediante instrumental convencional (correntímetros electromagnéticos, sensores de presión, sensores de altura resistivos, etc.) y anemómetros de placa caliente. Este trabajo es interesante porque se utilizó instrumental no convencional como son los anemómetros de placa caliente para estudiar las escalas turbulentas en la zona de *swash* y la zona de rompientes interior. Las mediciones de 1990 estuvieron orientadas a estudiar las escalas turbulentas en las zona de *swash* y en la zona de rompientes interior, mientras que en las de 1992 se estudió con mayor profundidad la turbulencia generada por la rotura del oleaje. En este último trabajo se propuso, además, un nuevo método para separar turbulencia de flujo oscilatorio basado en la disipación, el espectro del número de onda y en las hipótesis de Taylor (que asumen turbulencia congelada).

Experimentos a gran escala.

Los experimentos a gran escala realizados en EEUU son las campañas DUCK-82, DUCK-85, SUPERDUCK, y DELILAH y DUCK94, en la costa Este, y programa NSTS (I, II y III) en la costa Oeste. Este último se ha realizado en dos playas: Torrey Pines cerca de La Jolla y Leadbetter cerca de Santa Bárbara, ambas en California.

NSTS-1 Torrey Pines: (Seymour & Duane, 1978; Gable, 1979; Seymour & Gable, 1980; Guza & Thornton, 1980; Guza & Thornton, 1981; Seymour, 1983; Seymour, 1988), llevada a cabo por la National Oceanic and Atmospheric Administration durante 20 días (27/10/78 al 16/11/78) en la Playa de Torrey Pines. Se realizaron mediciones conjuntas de olas (dentro y fuera de la zona de rompientes), corrientes inducidas por la rotura del oleaje, así como *rip currents*, batimetría, *run up*, niveles del mar, meteorología y el transporte y características de sedimentos así como el uso de fotografías y trazadores.

NSTS-2 Leadbetter: (Gable, 1981; Thornton & Guza, 1986; Guza *et al.*, 1986; Dean *et al.*, 1987; Seymour, 1988) llevada a cabo en la playa de Leadbetter, Santa Bárbara, California, por la National Oceanic and Atmospheric Administration durante 1979-1980, durante 30 días más 14 meses de mediciones de transporte de sedimentos. Se trata de una playa abierta de arena y longitudinalmente uniforme con una zona de rompientes estrecha. La pendiente varió entre 1:33 y 1:16. Se realizaron medidas conjuntas de oleaje (zona de rompientes y zona de *swash*), mareas, corrientes, batimetrías, *runup*, meteorología, temperatura, transporte y características del sedimento (con sensores, fotografías y trazadores de arena fluorescente).

NSTS-3 (Seymour, 1987) llevada a cabo en 1981 en una playa de Virginia con una duración de 5 meses y estuvo orientada a la medición del transporte de sedimentos, olas y batimetrías.

FRF-DUCK'82: (Sallenger *et al.*, 1983; Mason *et al.*, 1984; Haines & Sallenger, 1994), llevada a cabo por Field Research Facility (*FRF*), US Geological Survey y Coastal Engineering Research Center (*CERC*) en Octubre de 1982 en la Playa de Duck, Carolina del Norte, en el muelle *FRF* del *CERC*. Se trata de una playa barrada de arena longitudinalmente uniforme. Se utilizó el muelle *FRF* para los experimentos, donde se realizaron medidas conjuntas de oleaje (dentro y fuera de la zona de rompientes), corrientes, transporte de sedimento y batimetrías utilizando el Coastal Research Amphibious Buggy (*CRAB*) (Birkemeier y Mason, 1984), así como un trineo móvil.

FRF-DUCK'85: (Mason *et al.*, 1987; Hubertz *et al.*, 1987; Birkemeier *et al.*, 1988; Kraus *et al.*, 1989) llevada a cabo por la *FRF* y el *CERC* durante 19 días en Septiembre y 11 días en Octubre de 1985. Cabe destacar que entre el 26 y 27 de Septiembre el huracán *Gloria* pasó por la *FRF*. Se realizaron medidas de oleaje dentro y fuera de la zona de rompientes, corrientes (inducidas por la rotura del oleaje y el *undertow*), corrientes superficiales por medio de un radar, numerosas trampas de arena, batimetrías por medio del *CRAB*, más la meteorología y el viento.

SUPERDUCK (Crowson *et al.*, 1988; Byrnes, 1989; Birkemeier *et al.*, 1989; Rosati *et al.*, 1990), llevada a cabo por la *FRF* y el *CERC* durante 22 días en Septiembre y 22 días en Octubre de 1986. Se realizaron medidas hidrodinámicas continuas a lo largo de la *FRF* de oleaje, corrientes, sedimento en suspensión, tanto en condiciones de calma como en temporal. La batimetría general con 20 perfiles de 600 m cada semana en Octubre y diariamente en Septiembre (23 mediciones de cada perfil registradas en total) mediante el *CRAB*, más numerosos levantamientos de detalle. Se midió además meteorología y viento, temperatura y densidad del agua, ángulo de incidencia del oleaje y anchura de la zona de rompientes mediante filmaciones. Además se realizaron otros 30 experimentos por parte de numerosas instituciones:

DELILAH: Duck Experiment on Low-frequency and Incident-band Longshore and Cross-shore Hydrodynamics, (Birkemeier *et al.*, 1991; Scott *et al.*, 1991; Smith *et al.*, 1992; Smith *et al.*, 1993), llevada a cabo por la *FRF*, y el *CERC* durante los días 1 al 21 de Octubre de 1990 en la playa de Duck, Carolina del Norte, EEUU. Se realizaron medidas hidrodinámicas continuas en la *FRF*, de oleaje, corrientes, batimetrías (con el *CRAB*), meteorología y además, se utilizaron imágenes de vídeo para medir *set up* y ondas largas en la línea de orilla (e.g. Lippmann & Holman, 1992). Estos ensayos representan uno de los conjuntos de datos de campo más completos para validar

modelos morfodinámicos 2DV, incluyendo eventos de erosión, sedimentación, formación y migración de barras. Estas medidas han permitido el estudio del transporte de sedimentos producido por las distintas componentes del flujo (e.g. Howd *et al.*, 1991; Scott *et al.*, 1991). También es de utilidad para modelos hidrodinámicos Q3D, ya que dispone de medidas de la distribución transversal de la corriente longitudinal (e.g. Smith *et al.*, 1993; Church & Thornton, 1993) y del *undertow* (e.g. Smith *et al.*, 1992).

DUCK'94: (Birkemeier & Thornton, 1994; Birkemeier & Hathaway, 1996) llevada a cabo por la FRF y el CERC durante los días 9 al 19 de Agosto y del 3 al 21 de Octubre de 1994 en la playa de Duck, Carolina del Norte, EEUU. Campañas planeadas en base a los resultados de las experiencias anteriores (e.g. DELILAH) es, posiblemente hasta la fecha de ejecución de esta campaña, el mayor de los experimentos realizados, involucrando de 70 a 100 personas durante Octubre de 1994. Su principal objetivo fue afinar el diseño de los experimentos de mayor escala *SANDYDUCK* (ver Birkemeier & Hathaway, 1996), incluyendo medidas de morfología, transporte de sedimentos a pequeña y media escala, *shoaling*, patrones de rotura del oleaje (Lippmann & Thornton, 1996) y evolución del sistema de barras (Gallagher *et al.*, 1996) por medio del análisis de imágenes de video circulación costera, y zona de *swash*. Además, en Duck'94 una serie de altímetros colocados en dirección perpendicular a la costa permitió medir por primera vez en tiempo real los cambios en el fondo, incluyendo el monitoreo de las migraciones "*offshore*" de la barra sumergida.

SandyDuck'97.- La campaña de campo SandyDuck, llevada a cabo en junio de 1997, fue una apuesta muy ambiciosa que reunió a investigadores del Scripps Institution of Oceanography (SIO) y del Field Research Facility (FRF), así como otras 23 organizaciones entre Agencias, Universidades y Compañías, y fueron patrocinados por el Coastal Research and Development Program de la US Army Corps of Engineers, el Coastal Dynamics Program de la Office of Naval Research, y la Coastal and Marine Geologic Surveys Program del United States Geological Survey. Estas campañas fueron la culminación de 7 años de planificación y ya durante las 6 semanas de mediciones primarias contaba con cerca de 400 sensores, que comenzaron a medir el 22 de Septiembre de 1997. De hecho, puede considerarse que SandyDuck'97 es la culminación de una serie de esfuerzos previos de medidas (campañas descritas anteriormete) en la zona costera llevadas a cabo en las instalaciones Duck, Carolina del Norte. El objetivo principal de estos experimentos fue la mejora de los conocimientos en la dinámica de la zona de rompientes y su modelado numérico. De manera global, se puede decir que las campañas DELILAH hicieron énfasis en la hidrodinámica en la zona de rompientes en presencia de una batimetría con barra altamente dinámica, mientras que Duck'94 y SandyDuck aportaron componentes para resolver incertidumbres en los mecanismos de transporte de sedimentos y evolución morfológica a distintas escalas espacio-temporales (desde formas del fondo como ripples hasta barras de arena en la zona cercana a la costa. Durante los experimentos SandDuck se repitieron la mayor parte de los ya realizados en Duck'94, aunque con una cobertura espacial mayor. Una innovación importante de SandyDuck fue que se midió de manera precisa y con alto detalle, las elevaciones de la superficie libre, cuyo gradiente es una de las fuerzas principales en la zona de rompientes. También se midió con detalle la pendiente de la superficie del agua (con manómetros) que es una información crítica para entender los mecanismos de las corrientes longitudinales a la playa, además del uso actualizado del trineo utilizado en Duck'94. También fueron utilizadas las técnicas de percepción remota. Los procesos en la zona de *swash* fueron observadas y monitoreadas

pos sistemas de video y algunas otras observaciones con sistemas de radar. Incluso hubieron medidas de interés para la marina norteamericana ya que se midieron tanto la acústica en la zona cercana a la costa con la producción de burbujas.

Otras campañas norteamericanas de interés son:

Del Monte, Monterrey (Thornton *et al.*, 1976; Thornton, 1979), llevada a cabo por la Naval Postgraduate School, Monterrey, California, durante varios días entre Abril de 1973 y Marzo de 1975 en la playa Del Monte cerca de Monterrey. Se trata de una playa de arena ($d_{50} = 0.2$ mm), con pendientes entre 1:14 y 1:40, roturas tipo *spilling* o *plunging*. Las mediciones incluyeron batimetría, oleaje, corrientes y características de los sedimentos.

Campañas en las costas del Lago Michigan (Ludington), llevadas a cabo por (a) la Purdue University en 1976 (Meadows, 1976), (b) Argonne National Laboratory de Illinois durante dos temporales en Noviembre de 1977 y Abril de 1978 (Allender *et al.*, 1978) y (c) El CERC y la Oregon State University en Septiembre de 1988 durante 8 días (Rosati *et al.*, 1991). Los experimentos de 1976 se realizaron en la costa este del Lago Michigan, en una playa multibarrada, con una pendiente 1:40. Los de Noviembre de 1977 y Abril de 1978 se efectuaron en la Playa de Zion (playa con dos barras longitudinales), en la costa oeste del lago. Finalmente los de Septiembre de 1978 se realizaron en la costa este del lago, en la Playa de Ludington.

4.2.7.- Campañas Rusas y de países ex-soviéticos

Anapa y Krimea, Mar Negro 1 - 2 (Longinov, 1963; Antsyferov *et al.*, 1990) llevadas a cabo en (a) unas playas cerca de la presa de Anapa (1950-1955) y (b) en la costa de Krimea (1965-1970). La estación de Anapa constaba de tres torres portantes de un cable-carril desde donde se efectuaban las mediciones. La estación de Krimea consistía en un muelle de caballete de 1.3 m de ancho apoyado en torres espaciadas 12 m desde donde se efectuaban las mediciones. En ambas campañas se realizaron mediciones de batimetría, olas, corrientes y características de los sedimentos.

Kamchiya, Mar Negro 3 - 4 (Antsyferov *et al.*, 1990) llevada a cabo en 1977, 1978 y 1979 en Shkorpilovty, cerca de la desembocadura del río Kamchiya, en la costa del mar Negro en la que participaron 15 instituciones de 5 países entre las cuales se encuentran el Instituto de Investigación Marina (Warnemünde) y la Universidad Karl Marx (Leipzig) de Alemania oriental; el Instituto de Investigación Marina y Oceanología, la Academia de Ciencias de Bulgaria y la Universidad de Sofía (Bulgaria); la Academia de Ciencias de Polonia, el Instituto de Hidro-Ingeniería (Gdansk), la Universidad de Gdansk y la Universidad de Varsovia (Polonia); Academia de Ciencias de Rumania e Instituto de Investigación Marina Constanta (Rumanía); Instituto Shirshov de Oceanología, Instituto de Problemas Hídricos, Academia de Ciencias (Moscú y Gelnzik) de la URSS (Rusia); Academia de Ciencias de Lituania, Ucrania y Estonia. Se realizaron mediciones de batimetría, olas, corrientes y características de los sedimentos, complementadas con campañas oceanográficas periódicas.

Donuzlav-Kamchiya, Mar Negro -3 (Kuznetsov & Speranski, 1990; Speranski, 1994 a, b; y Speranski, 1995) llevadas a cabo por el Instituto Shirshov de Oceanología de Moscú y el Instituto de Oceanología de Bulgaria, de 1979 a 1988 en las playas Donuzlav en Krimea (Ucrania) y Shcorpilovcsi en la desembocadura del río Kamchiya (Bulgaria), en el Mar Negro. Ambas playas tienen arenas finas con $d_{50} = 0.2$ mm y con una pendiente del fondo de 1:50 entre los 0 y 5 m. La primera presenta un perfil bi-barrado mientras que la segunda no tiene barras. El objetivo fue estudiar la hidrodinámica de la zona de rompientes, concretamente en aspectos relacionados con la turbulencia, flujo oscilatorio, flujo másico, y *undertow*.

4.2.8.- Campañas Australianas

Eastern Beach, costa de Gippsland, Victoria, sudeste Australia frente al mar de Tasmania (Wright *et al.*, 1986) llevada a cabo en Mayo de 1981 por la Universidad de Sydney, la Oficina de Investigación Naval, el Instituto de Ciencias Marinas de Virginia y la Universidad de Florida (EEUU). Se trata de una playa de arena longitudinalmente uniforme, con un $d_{50} = 0.3$ y ambiente micromareal. Los objetivos se centraron en la obtención de datos de campo que permitan estudiar la morfodinámica de playas con sistemas de surco - barra. Se llevaron a cabo mediciones de topografía, corrientes, oleaje (tanto en aguas profundas como en la playa), transporte de sedimentos y niveles del mar.

Otras campañas australianas de interés son:

Moruya-Broulee-Bracken Beaches (Wright *et al.*, 1979), llevadas a cabo por la Universidad de Sydney durante los años 1971 a 1977 en las playas de Moruya, Broulee y Bracken (Australia). Se realizaron mediciones conjuntas de batimetría, olas, corrientes y características de los sedimentos.

Cable Beach (Wright *et al.*, 1982), llevada a cabo por la Universidad de Sydney en 1980, durante 20 días en la playa Cable, Broome (Australia occidental). Se realizaron mediciones conjuntas de batimetría, olas, corrientes, transporte y características de los sedimentos.

Bracken Beach: (Black & Rosenberg, 1991), llevada a cabo por el Instituto Victoriano de Estudios Marinos en 1989, en un transecto de la Playa Bracken (Australia). Se realizaron mediciones conjuntas de olas, corrientes, mareas, transporte y características de los sedimentos.

4.2.9.- Campañas Sudafricanas.

Los principales experimentos sudafricanos fueron realizados dentro del programa CAESAR (*Coastal Area Environmental and Sediment Applied Research*) (Swart, 1988). Estos experimentos fueron realizados en las siguientes campañas:

Río Sondangs (Swart, 1984, 1988), llevada a cabo por el Council Scientific and Industrial Research (CSIR), programa CAESAR (1983) en una playa de arena cerca del río Sondangs en la Bahía de Algoa. Se realizaron mediciones de batimetrías, oleaje, corrientes (sensores y colorantes), fotos aéreas, transporte y características de sedimentos.

Walker Bay (Swart, 1988), llevada a cabo por el CSIR (programa CAESAR) en 1986 en la Bahía Walker. Se trata de una playa arenosa con una zona de rompientes de 500 m de ancho y un rango de mareas de 1.5 m. Se realizaron levantamientos batimétricos, mediciones directas dentro de la zona de rompientes de altura de ola, corrientes con colorantes y fotos aéreas, transporte (medio e instantáneo) y características de los sedimentos.

Walker Bay (Schoonees, 1991 y Coppoolse *et al.*, 1992) llevadas a cabo por el CSIR, programa CAESAR 3 en 1987 y programa CAESAR 4 en 1990 en la Bahía Walker. Las mediciones consistieron en levantamientos batimétricos periódicos apoyadas con diversas técnicas mediante el uso de un helicóptero, obtención de series temporales de olas y corrientes obtenidas durante 3 horas de medidas desde el comienzo de cada marea, dentro y fuera de la zona de rompientes (profundidades menores a 1.5 m, 5 m, 10 m y 20 m de profundidad. Adicionalmente, se utilizaron dos plataformas móviles (transportadas con el helicóptero) en distintos puntos. Estas plataformas estaban provistas con sensores de altura, correntímetros electromagnéticos y sensores de concentración de sedimentos y se midieron 56 posiciones con éxito durante 25 minutos cada una.

4.2.10.- Campañas Francesas

Arcachon (Bellesort, 1988), llevada a cabo por SOGREAH en Noviembre de 1983 y Mayo de 1984 en Arcachon en la costa francesa de Aquitania. Las medidas se realizaron en una playa arenosa (pendiente 1:67) y $d_{50} = 0.35$ mm. Se realizaron mediciones conjuntas de oleaje, mareas (rango de 3-6 m), transporte y características de los sedimentos. El experimento estuvo centrado en el estudio del sedimento en suspensión bajo rotura del oleaje.

Otras campañas francesas de interés son:

Dunkirk (Latteux, 1988) llevado a cabo por el Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) durante varios períodos entre 1960 y 1977 en Dunkirk, costa del Mar del Norte. Las mediciones se llevaron a cabo en las vecindades de un puerto exterior para superpetroleros, antes y después de la construcción del puerto. Se trata de una zona con numerosos bancos de arena poco profundos sometida a intensas mareas y oleaje. Se midieron olas, corrientes, batimetrías y transporte de sedimento.

Contentin (Levoy & Antoine, 1991; Levoy *et al.*, 1995) llevado a cabo por la Universidad de Caen (Programa ROMIS) de 1991 a 1993, durante 4 días al mes en una playa de la península de Contentin, en la bahía de las Islas del Canal (Canal de la Mancha). Se trata de una zona con una batimetría compleja con playas de arena y

afloramientos rocosos, con una dinámica costera muy activa (variaciones de la línea de orilla en algunos puntos de 5 m/año) e intensa hidrodinámica (mareas de 15 m y velocidades de 3 m/s). Los experimentos incluyeron medidas a nivel regional y medidas a nivel local. Las medidas regionales fueron llevadas a cabo durante tres años. Consistieron en el registro de corrientes, olas, mareas, condiciones meteorológicas, batimetrías y transporte de sedimentos. Las medidas locales consistieron en adquisición de registros de olas y corrientes, levantamientos batimétricos, fotos aéreas, mediciones meteorológicas y transporte de sedimentos, incluyendo la zona de rompientes mediante trampas de sedimentos multidireccionales y trazadores fluorescentes.

Bas Champs (Bellesort, 1988), llevada a cabo por SOGREAH en 1965-1966, durante 6 meses en las playas Bas Champs (Francia). Se realizaron mediciones conjuntas de olas, corrientes, mareas, meteorología, transporte y características de los sedimentos.

4.2.11.- Campañas Polacas

Las principales campañas llevadas a cabo en Polonia fueron realizadas en la estación de Lubiatowo (IBW PAN'95) en la costa del mar Báltico (Druet *et al.*, 1976; Basinski, 1980 y Owczarczyk, 1989; Antsyferov *et al.*, 1990). En estas campañas participaron varias instituciones, entre las que destacan la Academia Polaca de Ciencias y el Instituto de Hidroingeniería entre otras. Los experimentos se realizaron conjuntamente con varios países del COMECON durante los años 1974, 1976 y 1983; con una duración de 36, 53 y 5 días respectivamente. La zona de estudio se trata de una playa longitudinalmente uniforme, con arena fina y con tres barras estables paralelas a la costa. El objetivo principal de dichas campañas fue realizar medidas sistemáticas (desde 1971-72) de las condiciones meteorológicas, hidrodinámicas y morfodinámicas en la zona costera, incluyendo la zona de rompientes. Dichas medidas fueron utilizadas para la caracterización de los procesos físicos costeros y la validación de modelos numéricos. Cabe destacar que en estas mediciones se utilizaron equipos diversos, entre los cuales hay instrumentos poco frecuentes en los países occidentales. Por ejemplo, las olas son medidas con radar, sensores de contacto, sensores capacitivos - resistivos, sensores de presión, etc. El *run up* fue medido con sensores de contacto. Las velocidades con correntímetros de presión, de rotor y trazadores. Las mediciones hidrodinámicas consistieron de niveles medios, olas, corrientes, oscilaciones de la línea de orilla (*swash* y *run-up*), oscilaciones de baja frecuencia, difusión y dispersión. Por su parte, las mediciones morfodinámicas consistieron de transporte de sedimentos en suspensión y fondo mediante trampas y trazadores radioactivos y luminosos, levantamientos batimétricos periódicos orientados al estudio de macroformas y evolución a largo plazo. Desde 1983 se mide mensualmente el perfil transversal, y anualmente un tramo de 3 km paralelo a la costa.

4.2.12.- Otras campañas

Campaña internacional NOURTEC: Mar de Norte (Hoekstra *et al.*, 1994; Van Vessem *et al.*, 1994), realizada conjuntamente por equipos de Alemania, Holanda y Dinamarca en sendos sitios escogidos en cada uno de los países participantes, bajo el auspicio del

programa MAST-2 de la UE. Por Dinamarca participaron la Danish Coastal Authority; por Holanda: la Universidad de Utrech, Rijkwaterstaat y por Alemania la Coastal Research Station. Los experimentos fueron planeados durante 1992 e iniciados en 1993, teniendo una duración prevista de 3 años. Se seleccionaron tres sitios en el Mar del Norte: en la península de Jutland, en Dinamarca occidental, en la isla de Terschelling en Holanda, y en la isla de East Frisian Waden en Alemania (Hoekstra *et al.*, 1994). El objetivo de estas campañas fue estudiar y explicar la factibilidad, la efectividad y el diseño óptimo de técnicas de regeneración de playas bajo distintas condiciones ambientales. En todos los experimentos se realizaron mediciones de batimetría, olas, corrientes, mareas, meteorología, transporte y características de los sedimentos.

Mar del Plata, en el Atlántico Sur (Caviglia *et al.*, 1991), llevada a cabo por la Universidad del Mar del Plata en Mar del Plata (Argentina) durante 13 meses. Se realizaron medidas conjuntas de batimetría, olas, transporte y características de los sedimentos.

Sylt (Dette, 1985; Oelerich, 1990; Dette y Oelerich, 1992), llevada a cabo por el Leichtwei ß Institute (Alemania) en 1987-91 en la costa oeste de la Isla Sylt en el Mar del Norte. Se trata de una playa arenosa rectilínea con barras longitudinales expuesta a altos niveles de energía (oleaje y mareas) y una erosión aproximada de 1 m al año. Las mediciones consistieron de levantamientos batimétricos periódicos, olas y corrientes, mareas, condiciones meteorológicas y características y transporte de sedimentos.

Kokkino Limanaki, Linoperamata y Rio (Moutzouris, 1988) llevadas a cabo en las playas de Kokkino Limanaki, Linoperamata (Creta) y Rio en el mar Egeo por la Universidad Tecnológica de Atenas (Grecia), durante varios períodos en los años 1986-1987. Se trata de ambientes micromareales con playas de arenas gruesas y gravas. Se realizaron mediciones conjuntas de levantamientos batimétricos periódicos, olas, corrientes, características de los sedimentos.

Costa de Taichung, Taiwan: (Chang & Hwang, 1994 y 1995), llevada a cabo por el Instituto de Puertos y Tecnología Marina, y el Consejo Nacional de Ciencia de Taiwan, durante varios períodos en los años 1992-93, en la playa de Taichung, (medio Oeste de Taiwan). Se trata de un ambiente mareal (carrera de marea de 4.6 m), con playas de arena con una pendiente de aproximadamente 1:80. Se realizaron mediciones de levantamientos batimétricos periódicos, viento, olas, corrientes, transporte y características de sedimentos en suspensión.

4.2.13.- Experimentos de gran escala más recientes

El estudio de los procesos costeros continúa requiriendo medidas de alta calidad, por lo que se siguieron planificando Campañas de gran escala. Algunos de estos proyectos son por ejemplo, en Europa, COAST3D encabezado por HR Wallinford en el Mar del Norte donde se construyó un Euro-CRAB y FANS en el Mar Mediterráneo, coordinado por el LIM-UPC, para medir en la zona de rompientes de la barra del Trabucador en el Delta del Ebro, hasta la más allá de la plataforma continental. Estos proyectos serán descritos mas adelante.

4.3.- Campaña UPC Delta'93

La campaña de medidas Delta'93 se llevó a cabo por el LIM-UPC del 12 al 17 de diciembre de 1993, dentro del marco de los proyectos de investigación sobre hidrodinámica y zona de rompientes financiados por la DGICYT, el MOPTMA y el programa MAST de la UE.

El diseño de los experimentos comenzó a finales de 1991, al constatarse que había numerosas incertidumbres que existían al adoptar hipótesis en la formulación conceptual de los procesos físicos y el modelado numérico de la hidrodinámica en la zona de rompientes (e.g. Sánchez-Arcilla *et al.*, 1991, 1992, 1995). Más aún, dentro del contexto de la investigación en España, estaba claro que se estaba en desventaja con respecto a otros países desarrollados que habían realizado estudios experimentales con anterioridad.

La realización de la campaña pasó por varios puntos, entre los que destacan la definición de los objetivos, la planificación general y después detallada (accesos, logística, desarrollo de la infraestructura para los aparatos de medida, presupuestos, alojamiento del personal, etc.) y la preparación final (compras, permisos etc.). Después de varios reconocimientos en varias playas del Delta del Ebro, estas medidas se realizaron en la playa de la barra del Trabucador del Delta del Ebro, seleccionada por encima de las playas "El Faro", "La Marquesa" y "Los Eucaliptos", por varios motivos:

- i.* Características geométricas: porque es una playa longitudinalmente muy uniforme, y porque cuenta con la presencia de barras sumergidas longitudinales paralelas a la línea de orilla, lo que simplifica las medidas, la interpretación de los datos y el modelado de los procesos físicos observados. Es además la más uniforme en su dirección longitudinal y la "más estable" respecto a los sistemas de barras sumergidas.
- ii.* Escasa carrera de marea: al estar en la costa mediterránea, la máxima carrera de marea astronómica es de menos de 30 cm, por lo que el nivel medio del mar puede considerarse como cuasi-estacionario, facilitando las medidas.
- iii.* Ventajas logísticas que supone la proximidad con Barcelona y la disponibilidad de una gran cantidad de información meteorológica, topobatómica, sedimentológica, de oleaje e hidrodinámica existente, gran parte de la cual ha sido obtenida y/o procesada por el mismo LIM-UPC (Rodríguez, 1995; 1996; Rodríguez *et al.*, 1995a, b, c; 1997a, b).

El principal objetivo de esta campaña de medidas fue la obtención de información 3D fiable y detallada de la hidrodinámica actuante en la zona de rompientes, incluyendo el oleaje, su transformación y el flujo inducido por la rotura del oleaje a las escalas hidrodinámicas de la turbulencia, flujo oscilatorio, ondas largas y corrientes. También se estudiaron la dispersión de trazadores y el transporte de sedimentos en suspensión. Este fue el primer estudio español de caracterización detallada de la zona de rompientes en un tramo del litoral mediterráneo español.

4.3.1.- Metodología desarrollada

La metodología desarrollada en este proyecto incluyo los siguientes puntos:

- i.* Selección y Diseño del instrumental.- Para la realización de estos experimentos, fue necesario diseñar un sistema integrado de mediciones hidrodinámicas para la zona de rompientes, ya que en el mercado no existía uno con las características requeridas para los experimentos. Esto obligó a combinar equipos de naturaleza de trabajo diferente y compatibilizar sus características específicas. Estaba claro que era necesario medir un conjunto completo y armónico de las distintas variables que intervienen conjuntamente en los procesos físicos de la zona de rompientes. Por lo tanto, el sistema debía consistir principalmente de sensores de velocidad (correntímetros) y niveles (sensor de alturas) con un sistema de corrección de la posición para el análisis de las velocidades (compás digital), de un equipo de adquisición y transmisión de datos (el *datalogger*) y de almacenamiento y control en tierra (computadoras personales), con generador de corriente para los equipos.

- ii.* Estrategia de Medidas hidro-morfodinámicas en la zona de rompientes.- El uso de un trineo de acero inoxidable marino, no magnético, (aprox. 2.5 m de longitud, 2.5 m de altura y 1.8 m de ancho y 350 kg. de peso), de arrastre terrestre y muy robusto construido especialmente para medir en la zona de rompientes. En el se colocaron 1 sensor de alturas (de contacto) de olas *ETROMETA*, 6 correntímetros electromagnéticos *Delft ems-P 2D* dispuestos verticalmente, que permitían realizar mediciones puntuales -Eulerianas-instantáneas y medias (en un punto x, y, z) con una frecuencia de muestreo de 20 Hz. La distancia de los correntímetros con respecto del fondo era de 10, 20, 30, 40, 60 y 80 cm. respectivamente, lo que permitió describir la variación vertical de las velocidades horizontales. También se colocó una compás digital *Aanderaa* (cuyo error es menor a 0.3 grados) que posteriormente fue utilizado para corregir las series de tiempo de las velocidades por las variaciones que pudo tener el trineo durante las mediciones, producto del golpeo del oleaje contra su estructura. También se colocaron tres sensores ópticos de concentración de sedimentos (OBS), un *datalogger* CR10 de 14 canales en un contenedor estanco. Simultáneamente a los experimentos hidrodinámicos, se midió la batimetría, antes y después de los experimentos mediante equipo topográfico convencional, y durante los experimentos mediante el trineo. Además se midieron concentraciones de sedimento en tres puntos de una vertical en el trineo y entre 5 y 6 puntos de las verticales correspondientes a dos trampas de sedimentos. También se tomaron muestras de sedimentos en varios puntos del perfil hasta calados cercanos a 3 m. Los datos fueron almacenados en ordenadores personales y respaldados en discos ópticos. El sistema de adquisición de datos de los correntímetros electromagnéticos y del sensor de alturas de olas fue diseñado para recibir conjuntamente lo doce canales de los correntímetros (6x2) y la señal del sensor de alturas para asegurar la sincronización de los datos de velocidad y las variaciones de la superficie libre. La frecuencia de muestreo de los correntímetro fue de 20 Hz y la del sensor de alturas fue de 4 Hz, de forma que permitió estudiar el flujo oscilatorio y la

macroturbulencia producida por la rotura del oleaje. La longitud de las series temporales medidas osciló entre 20 y 40 minutos.

- iii. Equipo de filmación.- Utilización de una grúa de con brazo de 20 m en el cual se coloco una cámara remota de vídeo, con la que se cubrió un área aproximada de 200 x 600 m² para vistas frontales de vídeo, con lo que de pudieron obtener medidas espaciales 2D superficiales -instantáneas y medias- del oleaje, oscilaciones de baja frecuencia y velocidades de desplazamiento de distintos trazadores. El sistema completo constó de tres partes:
 - a. Equipo de grabación; tres cámaras (dos remotas Panasonic color y B&N y otra portátil), dos magnetoscopios SVHS Panasonic (AG7359) y una interfase controladora de vídeo Panasonic.
 - b. Equipo de digitalización y proceso que consiste de una tarjeta digitalizadora *Data Translation* (DT2861), un ordenador y dos monitores de vídeo Panasonic (color y B&N)
 - c. Equipo de proceso; Software específico DigImage, CERC.

Las variables medidas para el estudio de la hidrodinámica de la zona de rompientes fueron las siguientes:

- i. Oleaje Incidente: dirección, periodos, alturas, espectros o grupos de ondas.
- ii. Niveles de la superficie libre y su variación en distintas escalas temporales (oleaje de viento, ondas largas y nivel medio).
- iii. Campo vertical de velocidades en las escalas temporales de interés (turbulencia, flujo oscilatorio y corrientes (incluyendo la variación vertical y temporal).
- iv. Campo horizontal de velocidades y sus variaciones en distintas escalas temporales.
- v. Difusión turbulenta horizontal: el postproceso y análisis digital de las imágenes de vídeo ha sido realizado con el sistema DIGIMAGE (Redondo *et al.*, 1994; Rodríguez, 1995; Rodríguez *et al.*, 1995a,b; Rodríguez *et al.*, 1997c).
- vi. Batimetría y sus cambios por efecto del transporte de sedimentos.
- vii. Características morfodinámicas de la zona de estudio como presencia de barras o líneas de rotura, formas rítmicas en la línea de orilla y zona de *swash*.
- viii. Datos sedimentológicos: características granulométricas y concentraciones de sedimentos en suspensión y sus variaciones espaciales y temporales.
- ix. Condiciones meteorológicas.

4.3.2.- Datos obtenidos durante la campaña Delta'93

Durante la campaña Delta'93 se realizaron un total de 12 *tests* agrupados en 5 casos distintos, de los cuales solo se analizaron con profundidad los *tests* 5 al 12.

De los datos obtenidos en la campaña Delta'93 se seleccionaron los casos I, II y III para estudiar las características del oleaje incidente y la evolución espacial del espectro de frecuencias al acercarse a la orilla, mediante el análisis de las imágenes de vídeo y los datos del sensor de alturas de olas y las boyas. La metodología y los datos pueden verse en Redondo *et al.* (1994).

Los casos III y IV fueron seleccionados para su análisis detallado y comparación con el modelo numérico de propagación y circulación Q3D NEARCIR (Collado *et al.*, 1995) del LIM-UPC. Estos resultados pueden verse en Rodríguez *et al.* (1994). El caso I fue seleccionado para estudiar la propagación desde aguas profundas (Boya de Cabo Tortosa) hasta aguas intermedias (Boya del Trabucador) llegando a la costa donde se realizaron medidas de vídeo (Rodríguez *et al.*, 1995 b).

En las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se presenta un resumen de las condiciones de oleaje predominantes durante la campaña agrupados en casos para su posterior análisis, las condiciones de oleaje medidas por una boya direccional colocada a una profundidad de 7.5 m y las condiciones de oleaje medidas en la zona de rompientes.

Casos	Fecha	Nivel de	Espectro	T_p [s]	Estado	Tests
I	26/05/93	Alto	Doble	T_{p1} 18, T_{p2} 3	No permanente	-
II	15/12/93	Bajo	Ancho	T_p 7.5	Q-permanente	1-4
III	16/12/93 am	Medio-Alto	Estrecho	T_p 6.0	Q-permanente	5-7
IV	16/12/93 pm	Medio	Estrecho	T_p 6.65 - 7.0	No permanente	8-12
V	17/12/93	Bajo	Ancho	T_p 7.5	Permanente	-

Tabla 4.1.- Condiciones del Oleaje durante los casos de Delta'93.

Test	Hrms [m]	T_p [s]	θ_m	GMT (16/12/93)
5	0.61	6.0	177.0	10:04
6	0.60	6.1	175.3	10:55
7	0.59	6.3	173.0	12:05
8	0.50	5.7	179.5	14:07
9	0.44	5.4	183.3	15:07
10	0.43	5.4	180.6	15:46
11	0.425	5.6	176.1	16:20
12	0.42	5.8	171.9	16:51

Tabla 4.2.- Condiciones de oleaje incidente medidas a 7.5 m de calado y a 1500 m de la costa con la boya de oleaje direccional.

Test	Hrms [m]	T _p [s]	Y [m]	h [m]	V [m/s]	U [m/s]
5	0.47	7.1	87.9	1.29	0.48	0.15
6	0.38	7.1	73.2	0.80	0.88	0.19
7	0.31	8.0	65.1	0.70	0.66	0.13
8	0.41	7.1	93.5	1.34	0.23	0.08
9	0.40	7.1	79.8	0.70	0.62	0.24
10	0.33	7.1	74.0	0.68	0.60	0.16
11	0.27	8.0	69.5	0.60	0.46	0.11
12	0.18	8.0	60.0	0.38	0.28	0.10

Tabla 4.3.- Condiciones de oleaje y corrientes (2DH) medidas con el trineo en la zona de rompientes; Y: coordenada perpendicular a la costa (L. Orilla = 50 m), h: profundidad media, V: corriente longitudinal y U: corriente de resaca (undertow).

4.3.3.- Proceso de datos

El proceso de datos¹ involucró las fases de depuración, análisis estadístico, separación de componentes de velocidades a distintas escalas hidrodinámicas (corrientes, ondas largas y flujo oscilatorio) mediante filtrado numérico y análisis espectral de las distintas escalas antes mencionadas. Los datos de las boyas direcciones fueron procesados y analizados para los 5 casos. Los datos de oleaje dentro de la zona de rompientes medidos con el sensor de alturas de olas (a una frecuencia de muestreo de 4 Hz y con una resolución de ± 2.5 cm) fueron procesados y analizados para los casos III y IV en su totalidad, mientras que el caso II fue procesado tan solo parcialmente. Debido a lo laborioso que es el análisis digital de las imágenes de vídeo, sólo se analizaron parcialmente los casos I, II, III y IV. Una descripción completa de estos análisis puede verse en Bahía (1997). Las direcciones del oleaje dentro de la zona de rompientes se han obtenido mediante los correntímetros para los casos III y IV. El post proceso se inicia con la corrección de la dirección de cada componente de los correntímetros utilizando los datos registrados con el compás digital del trineo. Como esta dirección cambiaba durante las mediciones, se transformaron todas las series a componentes Norte-Este. Con esto se obtuvieron ficheros originales a partir de los cuales se pueden extraer los canales que se deseen, con una frecuencia dada (menor o igual a 20 Hz) y con un tiempo inicial y duración prefijada. Por lo tanto, fue necesario fijar otra variable para la extracción de las series de velocidades: el ángulo de proyección de la barra del Trabucador con respecto del Norte para estudiar, por ejemplo, las componentes paralela y perpendicular a la costa o paralela al oleaje incidente. De estas series se realizaron los análisis estadísticos y espectrales de las distintas componentes del flujo (corrientes, ondas largas, flujo oscilatorio o macroturbulencia) para los casos III y IV (12 tests x 6 CEM x 2 canales). La separación de componentes se realizó mediante filtros numéricos y medias móviles. Los resultados y metodología detallada se describen en Rodríguez (1995).

¹ El porcentaje de datos útiles obtenidos fue del 99%.

4.3.4.- Análisis de la metodología desarrollada

La metodología propuesta y utilizada durante la campaña Delta'93 funcionó exitosamente, puesto que se obtuvo un alto porcentaje de datos hidrodinámicos útiles de alta calidad con respecto al total medido. Además, se cumplió con el requerimiento de obtener un conjunto de datos armónicos que permitieron analizar las escalas hidrodinámicas de la zona de rompientes seleccionadas a priori como objetivo de la investigación. Asimismo, se obtuvo una experiencia importante en lo referente al diseño experimental de dicha campaña, así como la metodología y el software desarrollado por el laboratorio. Como experiencias importantes de cara a futuros trabajos experimentales de gran escala como Delta'93, se destaca la importancia de los siguientes puntos:

- i. No dejar nada a la improvisación; se debe hacer una planificación muy cuidadosa y realizar varios ensayos previos.
- ii. Verificar los instrumentos antes de llevarlos al campo y probarlos en condiciones lo mas parecidas posibles a las que se encontraran en la naturaleza. Se debe realizar una calibración anterior y posterior a los aparatos con el fin de establecer si ha habido derivas en los rangos de medida.
- iii. Poner especial cuidado en que haya una perfecta sincronización temporal en todos los equipos, especialmente si se quieren estudiar fenómenos físicos que requieran una resolución temporal alta.
- iv. En situaciones en los que las medidas no dependan de una automatización de los equipos electrónicos, (como es el caso del sistema integrado en el trineo), sino de equipo humano, es importante que haya una organización plena, planificando y ensayando diversos aspectos previamente a los experimentos, como por ejemplo la duración y el tipo de medidas.
- v. Las medidas en campo, además de ser muy costosas, requieren de un esfuerzo logístico considerable, antes, durante y después del trabajo de campo. Por ello es importante maximizar la eficiencia del tiempo de montaje de todo el aparato logístico. Esto se logra planificando detalladamente los experimentos y concentrando todos los esfuerzos en medir en una zona previamente escogida, ya que el tiempo de montaje-desmontaje y traslados es muy grande.
- vi. En todo trabajo de campo es muy importante documentar rigurosa y disciplinadamente todos los experimentos, anotando en todo momento las observaciones que se hagan. Estos detalles permiten reconstruir situaciones que pueden ser importantes en las etapas de postproceso de datos y análisis.
- vii. Las imágenes de vídeo han demostrado ser de gran potencial en el estudio de la zona de rompientes, ya que pueden grabar distintos fenómenos como oleaje, corrientes, dispersión de trazadores, ondas de borde, zona de *swash*, barras sumergidas o topografía rítmica. Sin embargo el postproceso es muy laborioso, por lo que para disminuir la complejidad y el tiempo de análisis, es aconsejable realizar filmaciones cenitales que reduzcan el error en la transformación de coordenadas, así como utilizar cámaras a color y B&N ya que se aprovechan las ventajas que ofrece cada una (mayor capacidad de identificar trazadores y mayor

resolución, respectivamente), así como utilizar como mínimo 10 puntos para la transformación de coordenadas cuando se trabaja con una lente gran angular.

- viii. Con respecto a las medidas de corrientes, cuando hay un sistema de barras en playas arenosas, es posible encontrar mas de una línea de rotura por lo que puede haber corrientes longitudinales inducidas por la rotura sucesiva de oleaje reformado, además de corrientes inducidas por viento. Por ello se recomienda disponer de un sistema de medición de corrientes en el límite exterior de la zona de rompientes.

4.4.- Diseño experimental Delta'96

4.4.1.- Introducción

Como se mencionó en la descripción de la campaña Delta'93, el pleno conocimiento de los procesos físicos en la zona de rompientes es aún, una asignatura pendiente para poder mejorar los aspectos teóricos y para calibrar los modelos numéricos. Sencillamente, no es posible cuantificar los procesos físicos que actúan en la zona costera si no se cuenta con observaciones o estudios experimentales. Es precisamente para eso, por lo que se planea una campaña de medidas en campo. Sin embargo, son demasiados los parámetros físicos que interactúan en la naturaleza y que es deseable medir en conjunto, aunque que no siempre es posible hacerlo. Las razones son muy variadas y van, desde la falta de disponibilidad de recursos (económicos, humanos y de infraestructura), el correcto funcionamiento en campo de los equipos de medida, hasta la posibilidad de que la naturaleza decida tomárselo con calma cuando están montados todos los aparatos de medida (como en el caso de la campaña Delta'96) o al contrario, como en una tormenta y que los equipos de medida no puedan soportar el embate de las olas y terminen destrozados. En la zona costera, uno puede encontrar casi todos los procesos que pueden observarse en las regiones de aguas profundas, pero es en esta zona donde estos procesos físicos interactúan de forma mas concentrada e intensa en una zona más estrecha.

El diseño de experimentos en campo, que por lo general requiere de largos periodos de observación y esfuerzos múltiples, no es una tarea fácil de realizar. Se precisa establecer objetivos concretos que dependerán de la escala espacial y temporal (micro o meso escala) de los procesos físicos que se quieren medir. De lo contrario, no se puede optimizar la eficiencia del trabajo y no se puede planear el itinerario de medidas durante la campaña que, de forma general, debe abarcar como mínimo oleaje, corrientes en la zona cercana a la costa, transporte de sedimentos y cambios batimétricos en la zona de estudio (tabla 4.4).

Procesos a Cuantificar			Oleaje				Corrientes			Transporte de Sedimento						
			Propagación de Oleaje	Oleaje en la Zona de Rompientes	Oleaje en la Zona de Swash	Ondas de Baja Frecuencia	Corrientes Longitudinales	Dispersión Horizontal	Fricción con el fondo	Transporte por Arrastre de Fondo	Transporte en Suspensión	Transporte Longitudinal	Transporte Transversal	Transporte bajo Olas y Corrientes	Transporte Eólico	Evolución del Fondo
Parámetros a Medir			Oleaje		Corrientes		Transporte de Sedimento		Topografía					Otros		
			Oleaje Incidente	Oleaje en la zona de Estudio	Corrientes en la zona de Estudio	Transporte de Sedimentos en la zona de Estudio	Ripples	Cambios en la superficie del fondo	Perfil del fondo marino	Cambios en la línea de orilla	Topografía bidimensional	Meteorología	Calidad del Agua			
Alturas y Periodos (espectro de frecuencias)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Dirección del oleaje (espectro direccional)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Variación de la superficie libre			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Distribución de alturas de ola			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Niveles de Marea, y Otros (por ejemplo, tipos de rotura, etc)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Velocidad Media			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Fluctuaciones de la Velocidad			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Distribución de la Velocidad			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Dispersión de una mancha			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Corrientes costeras y de marea			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Concentración de Sedimento en suspensión			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Medidas de Transporte (Trampas)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Medidas de Transporte (Trazador Fluorescente)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Características del material del fondo			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ripples			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cambios en la superficie del fondo			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Perfil del fondo marino			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cambios en la línea de orilla			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Topografía bidimensional			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Meteorología			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Calidad del Agua			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Tabla 4.4.- Procesos costeros y parámetros asociados a medir en una campaña de campo.

De las experiencias previas se destaca que es altamente recomendable realizar una planificación general antes de la ejecución de una campaña, la duración de los experimentos, la estación del año en la que se hará, el reconocimiento *in situ* del sitio de medición y de ser posible, la realización de pruebas parciales y ensayos preelminares. Esto último es de especial importancia para comprobar que no se olvida nada. Nunca debe dejarse nada a la improvisación, ya que solo así se logra tener la capacidad de resolver problemas inesperados (es decir, es necesario adoptar hipótesis de actuación en situaciones extremas). Hecho esto, el siguiente paso es resolver la instrumentación adecuada, el acceso del equipo material (con equipo de repuesto si es posible y

disponibilidad de energía eléctrica) y humano que es necesario, además de obtener todos los permisos necesarios por parte de las autoridades o instituciones oficiales para la instalación de los equipos y del campamento. Esto es de especial importancia para tener en cuenta, sobre todo si se van a colocar estructuras con aparatos en el agua, para dar aviso a las autoridades que regulan el tráfico de barcos pesqueros o si el campamento estará montado en lugares ecológicamente delicados y en los que la presencia humana sea perjudicial, como cerca de dunas o en playas de desove. Como las condiciones del oleaje y mareas varían de un lugar a otro, resulta muy útil una recopilación de material de referencia como artículos o informes de estudios previos. Incluso toda la información rutinaria de las variables marítimas y climáticas disponible puede ser de utilidad para la planificación de las medidas.

4.4.2.- Objetivos y planificación de la campaña Delta'96

Como se ha mencionado en la introducción de este capítulo, esta campaña de campo está enmarcada dentro de un proyecto más grande y ambicioso: el Proyecto FANS (MAS3-CT95-0037) de la Unión Europea. Los objetivos fundamentales de este proyecto fueron estudiar los flujos de energía, agua, sedimentos y nutrientes a través de la plataforma. Los objetivos particulares de la campaña de campo Delta'96 fueron llevar a cabo un estudio integral de varios procesos físicos que interactúan en la zona costera; la obtención de datos hidrodinámicos de alta calidad y resolución 3D en las escalas de macroturbulencia, oleaje de viento, ondas largas y corrientes; la medición la magnitud y dirección del viento, temperatura y presión atmosférica; estudio de la morfodinámica con la obtención de datos de sedimento en suspensión asociado a los eventos de rotura del oleaje y levantamientos batimétricos en la zona de estudio. Los datos se tomaron de forma sincronizada, permitiendo la posterior correlación y cuantificación de la influencia de cada parámetro en un proceso. Así, la metodología general ha incluido la medición detallada y simultánea de topografía, hidrodinámica, transporte de sedimentos y meteorología en la zona cercana a la costa y en la zona de rompientes.

4.4.3.- Zona de Estudio

La zona de estudio es el Delta del Ebro (figura 4.2), por ser un ambiente poco afectado por el hombre, por su geometría longitudinal casi-uniforme y por la disponibilidad de datos previos obtenidos en la campaña Delta'93.

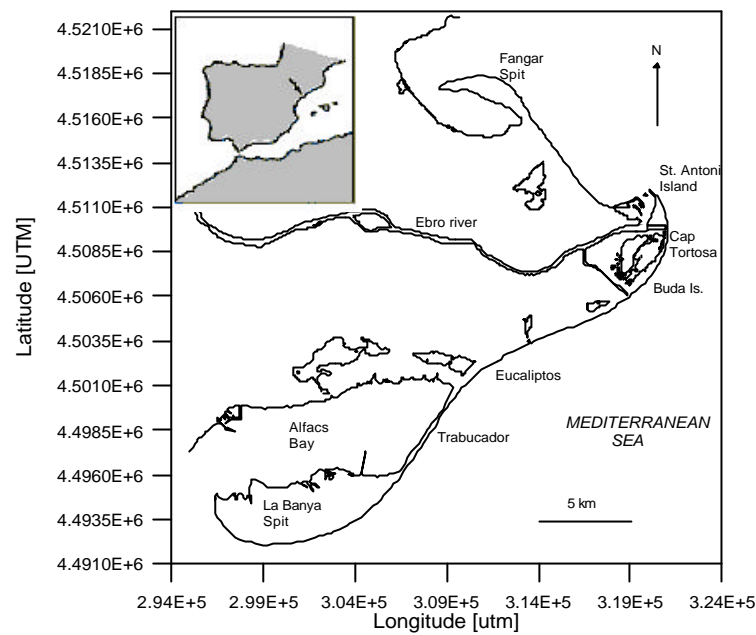


Figura 4.2.- Zona de Estudio: Delta del Ebro.

Los experimentos Delta'96 se llevaron a cabo en el periodo comprendido entre los días 30/10/96 al 10/11/96 y se centraron en la zona cercana a la costa, desde la línea de orilla hasta una profundidad aproximada de 3 m, en un transecto frente a la barra del Trabucador en el hemidelta sur. El tipo de costa seleccionada corresponde a una playa de arena fina ($d_{50} \approx 0.2$ mm) y longitudinalmente cuasi uniforme (figuras 4.3a, b) con barras sumergidas paralelas a la costa (figura 4.5).



Figuras 4.3a, b.- Barra del Trabucador.

El levantamiento de los perfiles topo-batimétricos (1248 puntos procesados distribuidos en 10 perfiles transversales a la costa) describe un área de 300 m de ancho de playa por 250 m de largo en las inmediaciones del perfil 11 (definido así desde la campaña Delta'93), en la parte central de la barra del Trabucador. La topografía se realizó antes y después de los experimentos, tomándose cada punto de los perfiles por radiación directa hasta una profundidad máxima de 2 m (figura 4.4) dentro de la zona de rompientes, por medio de topografía convencional (estación total *SOKIA SET 3B*, con distanciómetro infrarrojo y prismas ópticos), usándose además, el trineo e imágenes aéreas de vídeo.

El reconocimiento topo-batimétrico mostró una barra sumergida a unos 180 m de la costa cuya cresta se encontraba a unos 1.5 m de profundidad. En el caso de los puntos tomados con el trineo, las mediciones fueron tomadas dos veces (al inicio y fin de los ensayos) con el fin de determinar posibles rotaciones o movimientos, que finalmente sucedieron, como se explicará mas adelante.



Figura 4.4.- Medidas topográficas realizadas en la Barra del Trabucador.

Fuera de la zona de rompientes, en aquellas zonas donde la profundidad hacía imposible el acceso a pie, los levantamientos batimétricos se realizaron con métodos indirectos, usando la zodiac del LIM y escandallo, con posicionamiento terrestre. En este caso no se obtuvieron perfiles sino una nube de puntos.

Los trabajos realizados durante la campaña fueron siempre referenciados a un sistema de coordenadas local con el eje de abscisa paralelo a la dirección de la costa y el origen de coordenadas centrado en la zona de trabajo del trineo. Los datos se enlazaron planimétricamente al sistema de proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) y altimétricamente al geoide de Catalunya GEOID'91. Para ello fue necesario determinar las coordenadas UTM y cota ortométrica de tres puntos escogidos con anterioridad, situados en la cara oeste de la duna de la barra del Trabucador mediante el uso de receptores GPS de doble frecuencia (tipo *TOPCON TURBO SII*). Todas las medidas angulares se efectuaron aplicando la regla de Bessel y las distancias con infrarrojos, con reiteración y promediados de medidas.

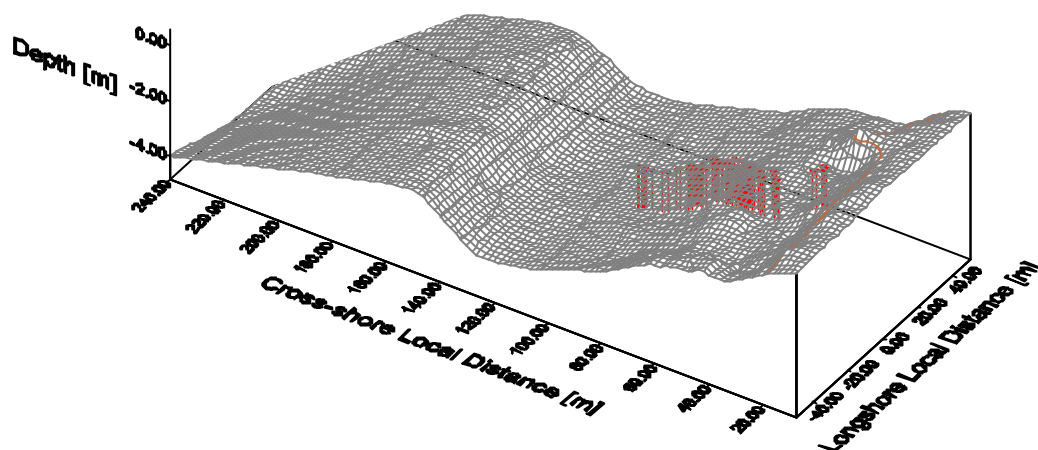


Figura 4.5.- Batimetría de la zona de estudio.

4.4.4.- Equipo de medición. Diferencias y mejoras respecto a la campaña Delta'93

Para la realización de esta campaña se contó con una situación muy ventajosa: existía el antecedente, la experiencia previa y material acumulados por la realización de la campaña Delta'93. Por esta razón solo se dará una breve reseña de esos aparatos. Una descripción más detallada se puede encontrar en Rodríguez (1995).

4.4.4.1.- Trineo

Para esta campaña se volvió a utilizar el sistema móvil de medición que sirvió de soporte para los correntímetros, los turbidímetros, el sensor de altura de ola (figura 4.6), el compás y la estación meteorológica. Aunque este trineo resulta ser sumamente versátil para la medición en la zona de rompientes, su utilización en el campo resulta un poco complicada. El trineo está construido en su totalidad de acero inoxidable (2.5 m de largo por 2.5 m de altura por 1.8 m de ancho) y es un artefacto que con todo el equipo montado (incluyendo el pesado y robusto *datalogger* de los correntímetros) pesa alrededor de 300 kg.

Por ello es absolutamente necesario idear un sistema de anclaje que permita el soporte suficiente, para que se pueda arrastrar y la fuerza necesaria para mantenerlo quieto mientras esta midiendo en plena zona de rompientes. Se escogieron 3 tubos de mas de 6 m de longitud para colocarse en forma de triangulo (2 en la playa y el tercero dentro del agua) que sirvieran de anclaje para el trineo y fue necesaria una visita previa a la barra del Trabucador para colocarlos. Sin embargo, enterrar tubos de 6 m de longitud no es una tarea trivial. En este caso, se contó con la ayuda de una pistola hidráulica colocada en el extremo de una lanza. Así, se lanzaron chorros de agua a presión contra la playa de manera que hubo una licuefacción momentánea que permitió el anclaje del tubo. A pesar que así parece una tarea relativamente simple, en realidad es muy complicado porque el estado optimo para meter el tubo dura solo un par de segundos y lograrlo

requiere de varios minutos de chorro continuo de la lanza dentro de la arena de la playa. El último tubo se ancló dentro del agua (usando igualmente la pistola hidráulica desde la zodiac), junto con un peso muerto de cerca de 70 kg al que se fijó una polea de gran tamaño. A los tubos de la playa se sujetaron un par de “*tracktels*” utilizados en construcción, que permitieron tirar, en uno u otro punto, para mover el trineo a lo ancho de la zona de rompientes (ver los puntos de medidas en la figura 4.5). Conforme la campaña avanzó, hubo la necesidad de recurrir a una grúa de gran tonelaje que sustituyera a uno de los *tracktels*, porque era sencillamente insuficiente para mover el trineo.



Figura 4.6.- Trineo con sensor de alturas de olas, 6 correntímetros electromagnéticos, 2 sensores de sedimento en suspensión, compás y estación meteorológica usado en Delta'96.

4.4.4.2.- Correntímetros electromagnéticos

La medición de flujos se puede abordar desde los dos puntos de vista clásicos de la mecánica de fluidos: mediciones eulerianas (seguimiento temporal de las velocidades un punto fijo) y lagranginas (seguimiento espacial de las velocidades). La existencia de varias escalas hidrodinámicas coexistiendo en la zona de rompientes, además de las altas concentraciones de arena y aire y la posibilidad de que los sensores queden fuera del agua en algunos intervalos de tiempo, hace que el problema de medir en la zona de rompientes no sea trivial. Después de hacer un análisis comparativo riguroso entre varios tipos de correntímetros para llevar a cabo la campaña Delta'93, se escogieron los correntímetros electromagnéticos modelo Delft P-EMS-S, ya que fueron los que ofrecieron mayor flexibilidad técnica en el sistema de medición, con una excelente respuesta de medida.

El sistema utilizado en Delta'96 incluyó 6 correntímetros electromagnéticos, 1 sensor de alturas, contenedor estanco, *datalogger* y software de adquisición y control de datos. Dichos sensores se basan en la medición de la variación de la corriente inducida por el

efecto Faraday en un campo magnético dentro de un fluido en movimiento. Poseen dos pares de electrodos de platino en una esfera de 40 mm de diámetro que permiten la medición de dos componentes de la velocidad proyectada en el plano de los electrodos. Tienen una frecuencia de sincronización de 50 Hz, que los hace insensibles a interferencias provenientes de la fuente de alimentación. El rango de medición es de ± 2.5 m/s con una precisión de ± 0.01 m/s. Son también prácticamente insensibles a los cambios de temperatura y conductividad del agua (Rodríguez, 1999).

Para las campañas de campo Delta'93 y Delta'96 las medidas en la zona de rompientes se fijaron a una frecuencia de muestreo de 20 Hz y a una escala de velocidades de ± 2.5 m/s. Los correntímetros 1-6 fueron dispuestos verticalmente en forma de helicoides (figura 4.7) a 5, 10, 25, 65 y 100 cm del fondo respectivamente, para obtener datos de velocidades en la columna de agua. Los correntímetros 1, 2, 3, 5 y 6 midieron el campo de velocidades 2DH. El correntímetro 4 colocado a la misma altura que el 5, ambos a 65 cm del fondo, midió el campo de velocidades 2DV de manera que se tuvieran controladas las 3 componentes del flujo a 65 cm del fondo (tabla 4.5).

EMC	1 2DH		2 2DH		3 2DH		4 2DV		5 2DH		6 2DH	
Dist. del fondo	5 cm		10 cm		25 cm		65 cm		65 cm		100 cm	
Canal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Componente Vel.	U1	V1	U2	V2	U3	V3	W4	-V4	U5	V5	U6	V6
2DH u	X		X		X				X		X	
2DH v		X		X		X		X		X		X
2DV w							X					

Tabla 4.5.- Distancia al fondo de los correntímetros y componente medida.



Figura 4.7.- Disposición Helicoidal de los correntímetros electromagnéticos en el trineo

4.4.4.3.- *Sensor de altura de ola*

Como en el caso del campo de velocidades, la medida de los niveles de agua en la zona de rompientes no es un problema trivial. Los sensores de medida deben ser robustos y deben estar colocados en un sistema de referencia lo más estable posible, por lo que preferentemente no deben estar apoyados en el fondo, ya que es demasiado dinámico. Igualmente se contó con la experiencia previa de la campaña Delta'93 en la que se había llevado a cabo una comparación rigurosa entre distintas alternativas. Así, se escogió un sensor de electrodos de contacto modelo *Etrometa* E46400 tipo *wave step-gauge*. Este sensor es sumamente robusto por lo que soporta muy bien las condiciones de medición en campo. Permite la medición de niveles con una resolución de 5 cm que es la distancia que hay entre los electrodos y permite frecuencias de muestreo de 2 y 4 Hz. La longitud del sensor es de 3 m, pudiéndose agregar tramos suplementarios de 3 m. No hay contacto entre el sensor y la cabeza electrónica ya que la señal se transmite por inducción. Este sensor está incorporado en el trineo en la misma vertical que los correntímetros electromagnéticos (está sincronizada y acoplada a los correntímetros, ya que la unidad electrónica está colocada en el contenedor estanco del trineo).

Una característica importante de este sistema de medición es que no se trata de un sistema estándar. Los 6 correntímetros electromagnéticos y el sensor de alturas de ola, envían sus registros acopladamente, primero al *datalogger* y de ahí a los ordenadores en tierra por medio de cables conductores blindados con conectores sumergibles. Por su complejidad, este sistema fue diseñado expresamente y en conjunto por el LIM y Delft Hydraulics.

4.4.4.4.- *Estación meteorológica*

En esta ocasión se contó con dos estaciones meteorológicas. Una situada en la parte posterior del trineo y otra localizada a 800 m del área de estudio y en una torre de observación sobre la cresta de una duna, aproximadamente a 10 m de altura sobre el nivel del mar, en las inmediaciones de la zona en estudio (figura 4.8). La estación sobre el trineo registró dirección e intensidad (media y máxima) del viento en intervalos de 10 minutos. La estación meteorológica cedida por el CEDEX fue del tipo Aanderaa. Se trata de un equipo totalmente autónomo, con alimentación por placas solares (para las instalaciones de campañas).

Los datos grabados son posteriormente traducidos a parámetros físicos, mediante los polinomios de ajuste correspondientes, propios de cada sensor. La frecuencia de muestreo de datos fue de 1 dato cada 10 minutos, velocidad promedio de 30 seg., y dirección instantánea. Además, se obtuvieron la presión atmosférica media de la muestra y la temperatura media de 1 minuto, no afectada por radiación. Las direcciones están referidas al N verdadero.



Figura 4.8.- Estación meteorológica Aanderaa (CEDEX) a 800 mts de la zona de medida.

4.4.4.5.- *Compás*

Este compás es de particular importancia en el momento de hacer el post-proceso de datos de corrientes (como se discutirá mas adelante). El trineo al estar sometido al golpeo constante del oleaje en la zona de rompientes, se ve afectado tanto en su posición como en su orientación. En la figura 4.9 se pueden apreciar las distintas posiciones del trineo durante las mediciones en Delta'96, y como siempre (a pesar de la poca intensidad del oleaje y las corrientes) tenía una posición final distinta a la inicial. Estos datos sirven para corregir las orientaciones de las velocidades horizontales medidas con los CEM. El intervalo de muestreo fue de 10 minutos.

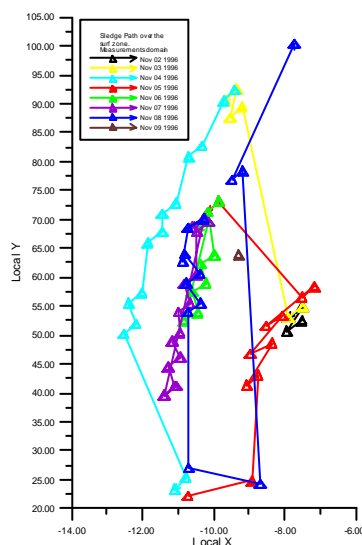


Figura 4.9.- Posición inicial y final del trineo durante los *tests* llevados a cabo durante la campaña Delta'96.

4.4.4.6.- Turbidímetros y correntímetros acoplados del equipo ruso.

En esta ocasión, a diferencia de Delta'93, se midió la estructura 3D del flujo y la capa límite del fondo. Se puso especial énfasis en medir la estructura 3D del flujo, por lo que se colocaron en el trineo un total de 8 correntímetros, un par de ellos a 65 cm del fondo y el del equipo ruso a 10 cm del fondo a lo largo del trineo y separados 1 m entre si, permitiendo así medir al estructura 3 D del flujo y la capa límite del fondo. Acoplados a estos correntímetros había dos turbidímetros (figura 4.10) que permitieron medir las concentraciones de sedimento en suspensión asociados al flujo hidrodinámico. De esta manera es posible seguir el efecto del paso de cada ola y descomponer el flujo 3D medido en la capa límite del fondo en las distintas escalas hidrodinámicas de estudio, asociando su contribución a la suspensión y transporte de sedimentos.



Figura 4.10.- Turbidímetros acoplados a los correntímetros electromagnéticos cerca del fondo.

4.4.4.7.- Video

Las técnicas de visualización de flujos son herramientas clásicas de la Mecánica de Fluidos. En los últimos años su potencial se ha visto aumentado enormemente con los avances tecnológicos que permiten la digitalización de imágenes y su proceso de modo eficiente. El instrumental utilizado en la campaña es sofisticado y consistió de dos cámaras remotas de vídeo con lente gran angular (figura 4.11), dos Magnetoscopios SVHS (PanasonicAG-7350), dos Monitores, una Tarjeta Digitalizadora (DT2861), una Interfase Controladora de Vídeo Panasonic, varios Ordenadores y Cintas de Vídeo.



Figura 4.11.- Cámaras de filmación, campaña Delta'96.

El equipo de digitalización es controlado por un software desarrollado por el CERC y Cambridge denominado DIGMAGE a través de una interfase controladora. Este programa permite obtener imágenes digitalizadas con una resolución espacial de 512×512 pixels y una resolución temporal de 25 Hz . En las campañas del LIM/UPC se decidió combinar técnicas que habían sido utilizadas anteriormente y de forma separada como:

- El empleo de trazadores en campo.
- Filmación de la zona de rompientes.
- Análisis digital de imágenes.

En este sentido, la técnica desarrollada es novedosa y por ello fue necesario ser cauteloso. Su aplicación y utilidad se manifiestan en la cuantificación de distintos aspectos como:

- Advección y dispersión de trazadores para estimar la difusión turbulenta longitudinal y transversal a la playa.
- Fracción de oleaje que rompe progresivamente.
- Frecuencias dominantes del oleaje.
- Ondas de borde y topografía rítmica.
- Barras sumergidas.
- Sistema de corrientes en la zona costera.

Las primeras filmaciones en campo realizadas por el LIM/UPC fueron llevadas a cabo del 12 al 17 de diciembre de 1993, durante la campaña Delta'93 en la que se hicieron las pruebas necesarias para establecer la técnica de filmación, por lo que tan solo un par de experimentos (filmaciones) reunían las condiciones necesarias para poder ser analizadas. Dichas filmaciones se realizaron colocando las cámaras en el extremo del brazo de una grúa de 20 m de longitud y simultáneamente con medidas hidrodinámicas.

Durante la campaña Delta'96 se obtuvieron un mayor número de filmaciones con mas contraste y resolución espacial. A diferencia de la campaña Delta'93, en esta ocasión las cámaras se colocaron en el extremo del brazo de una grúa de 40 m de longitud (figura 4.12) y se hicieron filmaciones zenitales colocando una cámara en un globo aerostático de 4 m de diámetro hinchado con helio (figura 4.13).



Figura 4.12.- Grúa utilizada para las filmaciones de la zona de rompientes. Delta'96.



Figura 4.13.- Grúa utilizada para las filmaciones de la zona de rompientes. Delta'96.

4.4.4.8.- Tetrápodo

Además de los correntímetros instalados en el trineo, en esta ocasión, y a diferencia de Delta'93, se contó con un sistema anclado al fondo del tipo "PUV" en la zona cercana a la costa. Se trata de un correntímetro S4DW (figura 4.14), de Interocean, USA, constituido por un conjunto de sensor de presión de alta precisión y un correntímetro electromagnético biaxial, para corrientes en el plano horizontal, y de ahí su denominación tipificada como sistema PUV.

Una gran ventaja que tiene el contar con sensores de este tipo es que se pueden obtener datos de la corriente a largo término, grabándose un archivo binario diferente para oleaje direccional y para valores promediados (marea y corrientes). El sistema tiene capacidad de almacenamiento de hasta 20 MBytes, equivalente a muestras de 30 minutos cada 3 horas durante 3 meses. Los parámetros de la toma de datos se programan *a priori* del fondeo, incluyendo la puesta en fecha y hora del equipo que quedan grabados en la EEPROM interna. Las especificaciones de este sensor son las siguientes:

- i. Velocidad: fondo de escala 350 cm/s, resolución 0.2 cm/s, precisión 2% de la lectura ± 1 cm/s, umbral 0.2 cm/s.
- ii. Dirección de corriente: fondo de escala 0 a 360°, resolución 0.5°, precisión $\pm 2^\circ$ para inclinaciones inferiores a 5° y $\pm 4^\circ$ para inclinaciones entre 5° y 25°.
- iii. Presión: sensor "strain gage" semiconductor, fondo de escala 70 m, resolución 0.4 cm de presión, precisión ± 10 cm, velocidad de respuesta 60 ms.
- iv. Inclinación (para corrección de la declinación): Fondo de escala $\pm 45^\circ$, con una resolución de 0.06° y una precisión de $\pm 0.25^\circ$.

Los datos que obtiene este equipo son la presión absoluta y las velocidades en la dirección N-S y E-W; la presión absoluta, con una escala completa de 70 m es medida en mBars y las velocidades en m/s. Durante el proceso, los datos de presión han sido transformados a altura de columna de agua por una expresión piezométrica lineal; su nivel de referencia se ha eliminado después de proceso espectral previo, y para el cálculo de la altura de ola fue necesaria una corrección para la atenuación hidrodinámica y una corrección que toma en cuenta términos no lineales (Grace, 1977).

La variación de presión registrada está relacionada con la oscilación que existe simultáneamente en la superficie por medio de una función de transferencia, en función de la profundidad, de la distancia al fondo y de la frecuencia de la onda.

De acuerdo a la teoría lineal, el factor para la atenuación hidrodinámica es

$$K_p = \left(\frac{\cosh(kb)}{\cosh(kz)} \right) \quad [4.1]$$

donde b es la distancia del S4DW al fondo (que en el caso de estos experimentos ha sido de 1.6 m) y z la profundidad. Este valor de K_p debe ser cambiado por K_p/N ,

dónde N , de acuerdo con los experimentos de Groves, puede ser ajustado como:

$$N = 1.55 - 4.5 \frac{h}{L} \quad \text{para} \quad 0.06 < \frac{h}{L} < 0.1 \quad [4.2]$$

$$N = 1.175 - 0.75 \frac{h}{L} \quad \text{para} \quad 0.1 < \frac{h}{L} < 0.5$$

La longitud de onda L se obtiene mediante un proceso iterativo a partir de la relación de dispersión lineal con una precisión de 0.1 m.

El proceso estadístico se realizó tomando una longitud de muestra $N = 4096$ y $\Delta t = 0.5$ s. Se usó el criterio de cruce por cero ascendente para evaluar los parámetros del oleaje (según las recomendaciones de la IAHR).

La instalación se efectuó por medio de un sistema de anclaje fijo, parecido a un “tetrápodo”, de unas dimensiones tales que el campo magnético creado por éste en la zona de medida sea despreciable.



Figura 4.14.- Tetrápodo con el sistema PUV para medidas hidrodinámicas fuera de la zona de rompientes durante la campaña Delta'96.

Los parámetros de la toma de datos se programan a *priori* del fondeo, incluyendo la puesta en fecha y hora del equipo y es posible establecer diferentes frecuencias de muestreo y promediados para medir oleaje y ondas de baja frecuencia:

- Oleaje
 - Muestreo: $\Delta t = 0.5$ s, f (muestreo) = 2 Hz.
 - Longitud de la serie de tiempo: $N = 4200$ puntos, equivalente a T total = 20 minutos.

- Cadencia del muestreo para el estudio del Delta del Ebro: cada hora.
- Inicio de la toma de datos: a cada hora exacta.
- Ondas de largo periodo: mareas y corrientes
 - Muestreo: $\Delta t = 0.5$ s, f (muestreo) = 2 Hz.
 - Promedio de un minuto.
 - Cadencia de repetición del muestreo 30 minutos.
 - Toma de datos: a los minutos 00 y 30 de todas las horas

Con estas medidas es posible obtener los siguientes datos horarios y diarios del oleaje:

- Periodos:
 - T_z : periodo medio de cruce por cero ascendente.
 - T_{zs} : periodo medio para el tercio mayor de altura de olas cruce por cero ascendente.
 - T_p : periodo de pico estimado espectralmente, integrado sobre todas las frecuencias y direcciones.
- Alturas:
 - H_s : o $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$, siendo m_0 la varianza de las alturas del oleaje.
 - H_{zm} : H máxima (cruce por cero ascendente).
- Direcciones:
 - $ThTp$: Periodo de pico para la dirección de banda (Peak period band direction).
 - $ThHf$: Dirección media para las bandas de frecuencias mas altas, evaluadas para bandas cuyas frecuencias estén por encima de 0.4 Hz.
 - $ThLF$: Dirección media para las bandas de frecuencias bajas, evaluadas para las bandas cuyas frecuencias estén entre 0.04 y 0.07 Hz.
 - Thm : dirección media evaluada como un valor vectorial medio.
 - D_s : Dispersión Standard para la distribución circular de las direcciones de llegada para la banda del periodo de pico.

4.5.- *Diseño experimental en el proyecto COAST3D*

En este apartado se describirá la zona de estudio y los experimentos llevados a cabo en la playa de Egmond aan Zee, en la costa holandesa, y en la playa de Teignmouth, en la costa sur de Inglaterra realizadas en el marco del proyecto Europeo COAST3D.

En el diseño experimental de estas campañas participaron numerosos investigadores de las instituciones participantes en el proyecto, con experiencia previa en campañas de campo. Entre ellos, participó personal del LIM-UPC, con experiencia previa en el diseño experimental, adquirido de las campañas Delta '93 y Delta'96.

4.5.1.- Descripción de los experimentos en Egmond aan Zee

Los experimentos COAST3D se llevaron a cabo en la playa de Egmond aan Zee, en la parte central de la costa holandesa del mar del Norte (ver figura 4.15) entre Den Helder (al norte) y Hoek van Holland (al sur). Esta extensión de la costa central de Holanda tiene una longitud aproximada de 124 km y está formada principalmente por playas arenosas longitudinalmente muy uniformes y que presentan un sistema de barras múltiples de arena sumergidas.

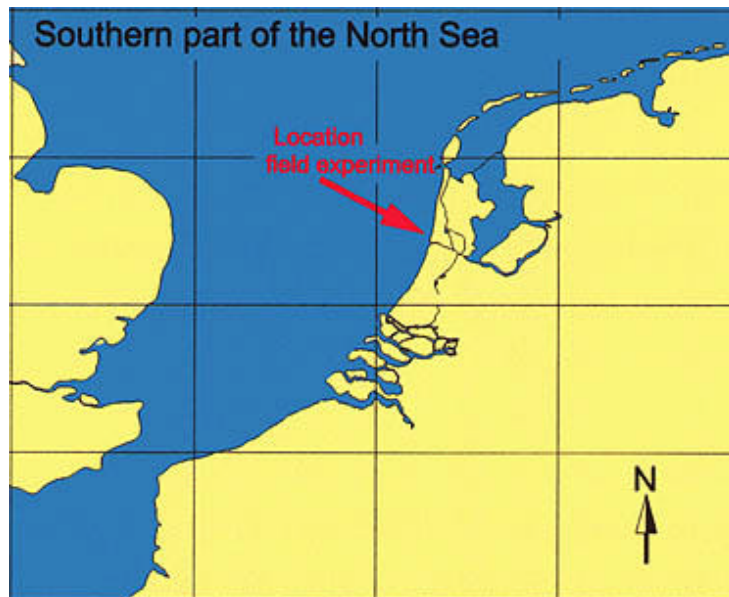


Figura 4.15.- Localización de la Playa de Egmond aan Zee, en la costa holandesa del mar del Norte.

Se considera una costa con energía mixta, es decir, el comportamiento morfológico global de esta costa está afectado por las olas y las mareas, aunque son las olas las que tienen mayor importancia relativa cerca de la costa (Dillingh & Stolk, 1989). Las diferencias longitudinales en el clima de oleaje en aguas profundas son pequeñas debido a la corta longitud de este tramo de costa holandesa y su orientación relativamente uniforme. En general, las mayores diferencias hidrodinámicas se experimentan en la dirección transversal, debido al talud del perfil y a la presencia de barras sumergidas.

Dado que el emplazamiento de la campaña está localizado en la semi-confinada y relativamente poco profunda cuenca del Mar del Norte ($h < 200$ m), el *fetch* es relativamente pequeño, por lo que el mar de fondo (oleaje tipo *swell*) solo puede llegar a esta zona de playas desde la parte norte del citado mar. Por lo tanto, el clima de oleaje en la playa de Egmond aan Zee está dominado por las olas de viento asociadas a zonas de bajas presiones que se trasladan en dirección W-E (es decir, desde el Atlántico hacia el continente europeo). Según datos (1979 – 1991) de una boya de oleaje localizada a unos 35 km de la costa de IJmuiden (a una profundidad aproximada de 22 m), el oleaje tiene una altura que varía entre 0 y 4 m, mientras que los periodos asociados están comprendidos entre los 2 y los 8 segundos (donde las olas con mayor periodo están asociadas con las olas más altas), cuya dirección de aproximación coincide con la máxima longitud del *fetch* (norte). La mayor parte de las olas se aproximan desde el

NW y SW, y debido a que la intensidad de los frentes de bajas presiones es menor en verano que en invierno, la altura de ola también presenta un comportamiento estacional, con una $H_s \sim 1.0$ m durante los meses de Abril a Agosto y $H_s \sim 1.9$ m entre Noviembre y Enero (Augustein *et al.*, 1990).

La carrera de mareas en la playa de Egmond aan Zee tiene un rango que varía entre 1.2 m en marea muerta y 2.1 m en marea viva. La duración de la creciente de marea es del orden de 4 horas mientras que el vaciado tiene una duración del orden de 8 horas.

La pendiente media de la zona costera, incluyendo el estrán y la zona de *surf* varía a lo largo de este tramo de la costa holandesa. Las mayores pendientes (1:150) se encuentran cerca de Egmond, mientras que las pendientes mas suaves (1:500) están en los extremos de esta costa, en Den Helder al norte y Hoek van Holland al sur (Stolk, 1989). En general se pueden encontrar de 1 a 4 barras sumergidas en la zona de rompientes de esta costa, disminuyendo el número al reducirse la pendiente del perfil. Aunque siempre hay barras de arena presentes, estas presentan un ciclo migratorio en dirección *offshore*, en el que se desarrolla una nueva barra cerca de la línea de orilla y va desplazándose hacia mar adentro, donde finalmente desaparece cerca del borde exterior de la zona de *surf* (Wijnberg, 1995).

En cuanto a la distribución granulométrica en la zona de estudio, no hay una distinción entre la tendencia de la distribución longitudinal y transversal del tamaño de grano. La mediana del tamaño de grano (d_{50}) de la arena de la playa a lo largo de la costa varía entre 150 y 300 μm (van Bemmelen, 1988).

No hay estructuras permanentes en la playa de Egmond (e.g. diques). El más cercano es el puerto de IJmulden, 15 km al sur. La morfología en la playa puede considerarse como representativa de la costa natural. El perfil transversal de la playa tiene dunas costeras, la playa y 3 barras sumergidas (figura 4.16). La orientación de la línea de orilla en la playa es $8^\circ - 188^\circ$ con respecto al norte verdadero.

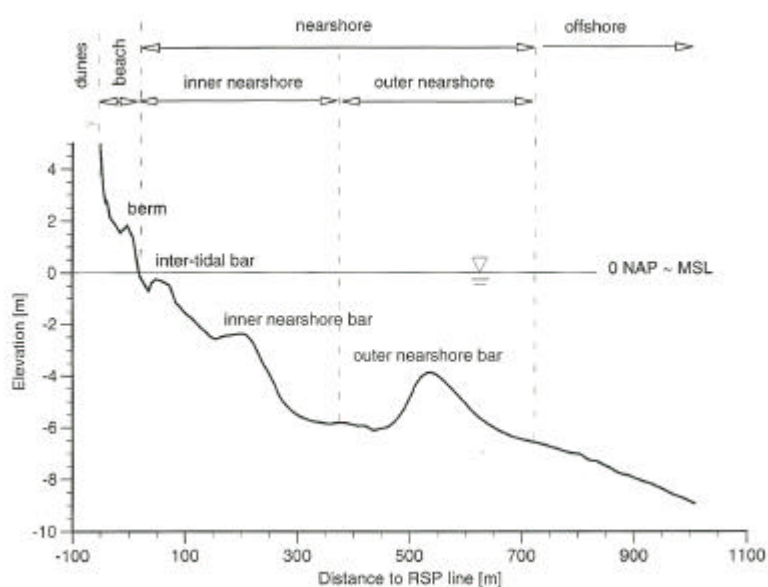


Figura 4.16.- Perfil transversal a la costa en la Playa de Egmond aan Zee (Wolf, 1997).

Las dunas costeras que se muestran en la figura son las dunas mas exteriores de un sistema de dunas mas grande. A lo largo de la playa de Egmond, el área de dunas tiene una anchura de alrededor de 2 km y una altura de unos 20 m por encima del nivel medio del mar. Es un sistema de dunas, muy estable, que está protegido contra la erosión por pastos y fanerógamas.

Las características morfodinámicas de las barras sumergidas varían debido a diversos procesos. El movimiento neto es en dirección *offshore*, con una tasa de migración del orden de 20 m por año. La variabilidad en la morfología de la barra exterior es menor respecto a la barra interior, mostrando una migración en dirección *offshore* del orden de 10 a 20 m por año.

4.5.2.- Descripción de las campañas de Egmond

El proyecto Coast3D fue un proyecto de colaboración ω -financiado por la Unión Europea (Programa Mast-III) desde Octubre de 1007 a Marzo del 2001. Los objetivos principales del proyecto fueron (Soulsby, 2001):

- Mejorar el conocimiento existente de los procesos físicos y morfodinámicos del transporte de sedimentos en la zona costera.
- Remediar la actual carencia de datos de validación de transporte de sedimentos y evolución morfológica apropiados para validar modelos numéricos de procesos hidro-morfodinámicos en dos sitios distintos, Teignmouth, UK y Egmond aan Zee, Holanda.
- Utilizar una serie de datos representativos de cada lugar para alimentar los modelos numéricos de predicción de transporte de sedimentos y evolución morfológica.
- Proporcionar herramientas de modelado numérico (validadas) y metodologías para usarlas de una manera apropiada a la gestión de la zona costera.

Como se ha explicado anteriormente en los antecedentes de campañas de campo, en Europa, la mayor parte de ellas se han llevado a cabo poniendo énfasis en los procesos hidrodinámicos. Por tanto, la propuesta del proyecto COAST3D fue una propuesta totalmente novedosa e innovadora, ya que se centró en el estudio de los procesos morfodinámicos. Otra característica distintiva es que en el proyecto se escogieron tanto costas no uniformes totalmente tridimensionales (Teignmouth), como costas razonablemente uniformes (Egmond aan Zee).

Así, las campañas de medidas en la playa de Egmond se basaron en 3 experimentos principales:

- El experimento piloto, llevado a cabo del 20 de Abril al 4 de Mayo de 1998. Los objetivos de estos experimentos fueron el probar el correcto diseño de las medidas de campo (de la campaña propiamente dicha) y probar los instrumentos y procedimientos de medida bajo condiciones reales.

- El experimento principal, llevado a cabo del 12 de Octubre al 20 de Noviembre de 1988. El objetivo principal de estos experimentos fue la recolección de datos de alta calidad para mejorar el conocimiento de los procesos morfodinámicos y evaluar los modelos numéricos morfodinámicos.
- Monitoreo continuo, con el objetivo de obtener información continua de las condiciones de contorno *offshore* y cerca de la costa, así como de las condiciones del lecho sobre largos periodos de tiempo, para proporcionar la información adecuada para los modelos numéricos y para permitir estimar que grupo de los datos recolectados durante la campaña es representativo de la zona. El periodo que cubre esta toma de datos se encuentra comprendido entre los experimentos piloto y principal, así como un periodo de tiempo de 4 meses después del experimento principal.

Durante las dos semanas del experimento piloto se produjeron tan solo tormentas moderadas, por lo que se adquirieron datos hidrodinámicos muy buenos, aunque hubo pocos cambios morfodinámicos. Por su parte, durante el experimento principal, que tuvo una duración de unas 6 semanas, se registraron varias tormentas, con alturas de ola significativa en aguas profundas $H_s \approx 5$ m, las cuales produjeron cambios importantes en la morfología, aunque también provocaron problemas logísticos para la toma de datos. No obstante se adquirieron un conjunto de datos muy representativos de las condiciones extremas en la playa de Egmond.

Las medidas realizadas en la playa de Egmond se llevaron a cabo en un área de 500 metros de longitud, entre los puntos 39.50 y 40.00, como se puede observar en la figura 4.17, y se localizaron en una sección razonablemente recta y uniforme de la costa holandesa. De esta manera, era de esperar que no hubiese grandes variaciones en el clima de oleaje en aguas profundas a lo largo de la costa.

En estas campañas se obtuvieron una gran cantidad de datos hidrodinámicos y morfodinámicos (utilizados para calibración numérica), entre los que destacan los siguientes:

- Niveles de agua en 15 puntos.
- Alturas de ola y periodos en 18 puntos.
- Velocidad y dirección de las corrientes en 14 puntos fijos y un punto móvil.
- Concentración y transporte de sedimentos en un punto fijo y en un punto móvil.
- Formas del fondo.
- Medidas continuas de la batimetría de la playa, tanto en la zona cercana a la costa como en aguas profundas.
- Medidas con trazadores fluorescentes.
- Imágenes ARGUS de la rotura del oleaje en la zona de rompientes (mostrando la posición de las barras).
- Imágenes RADAR X de la propagación del oleaje.
- Parámetros meteorológicos.

Como se ha dicho anteriormente, la batimetría se caracteriza por tener 3 barras (figura 4.16), una al costado de la costa (que no está presente todo el tiempo), una segunda en la zona de rompientes, que está segmentada por canales de corrientes de retorno (figura 4.18) y una tercera barra mas exterior. Se ha observado que la barra situada en la zona

de rompientes es la barra más dinámica, y es ahí donde se han realizado la mayor parte de las medidas durante estas campañas (figura 4.17).

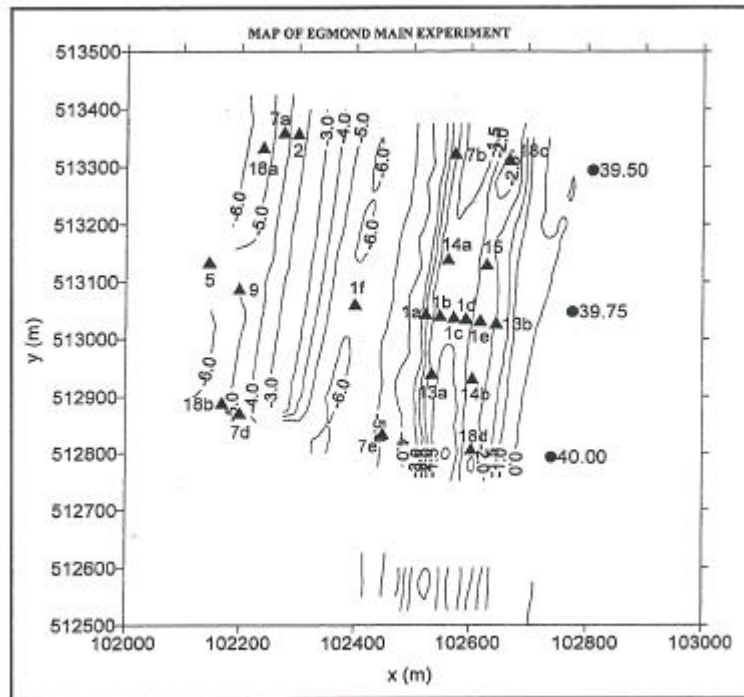


Figura 4.17.- Mapa de localización de los dispositivos de medida y batimetría en la playa de Egmond (Ruessink, 1999).

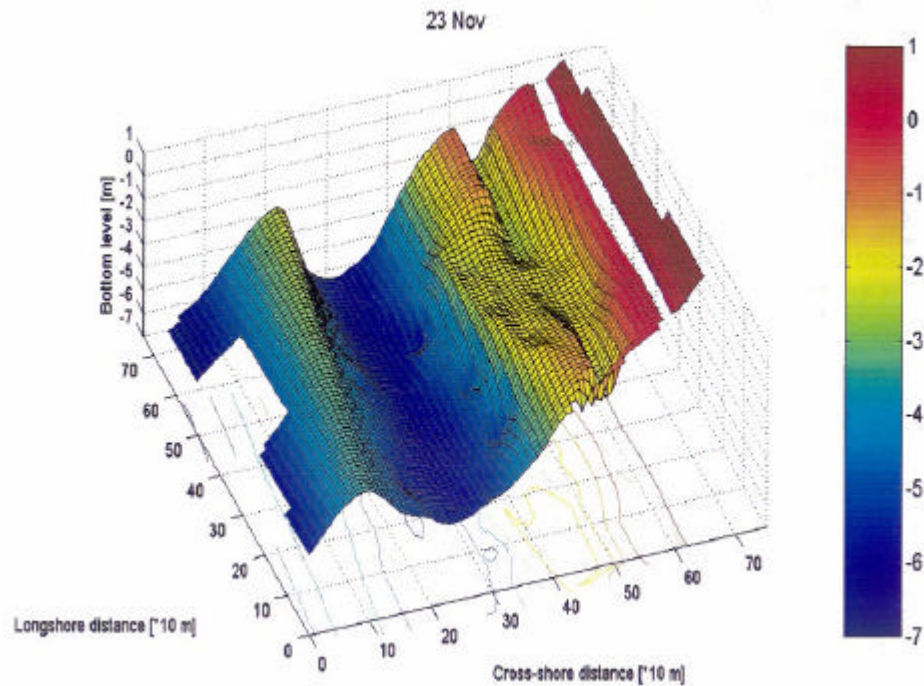


Figura 4.18.- Barra de arena rota por canales de corrientes de retorno en la playa de Egmond (Hoekstra, 2001)

Las medidas del experimento piloto se realizaron entre el 20 de Abril y el 9 de Mayo de 1998. Durante estas medidas las condiciones de oleaje fueron relativamente suaves, por lo que los cambios batimétricos registrados fueron mínimos. Las condiciones mas severas de oleaje y viento registradas durante estas campañas fueron los 5 días comprendidos entre el 30 de Abril y el 4 de Mayo (bursts 5064-5148). Las alturas de ola significante oscilaron entre 0.5 m y 1.8 m y la elevación debida a la marea osciló entre -0.8 m y 1.2 m respecto al nivel medio local.

Las medidas del experimento principal se realizaron entre el 18 de Octubre y el 19 de Noviembre de 1988. Las alturas de ola significante registradas variaban entre 0.5 y 4.9 m, mientras que los niveles de marea oscilaron entre -1.1 a 2.2 m con respecto al nivel medio local. Estas condiciones hidrodinámicas extremas se tradujeron en cambios batimétricos importantes. Las barras de arena, razonablemente uniformes y rectas, se volvieron sinuosas y seccionadas. En planta también se registraron cambios importantes en la playa, ya que se detectaron cambios de volumen de hasta 3 m³ por metro de anchura al día.

Para la calibración numérico-experimental del modelado numérico se han utilizado las medidas obtenidas a partir de los siguientes instrumentos:

- Boya direccional, situada a 15 m de profundidad, de la cual se han tomado datos de altura de ola significante, periodo de pico, ángulo de aproximación del oleaje (respecto al Norte) y el nivel medio del mar.
- Sensores de altura de ola (los puntos 1d, 1c, 1b, 1a y 2 de la figuras 4.17 y 4.19), situados a 164.75 m, 199.75 m, 224.75 m, 253.82 m y 513.65 m de la costa respectivamente.

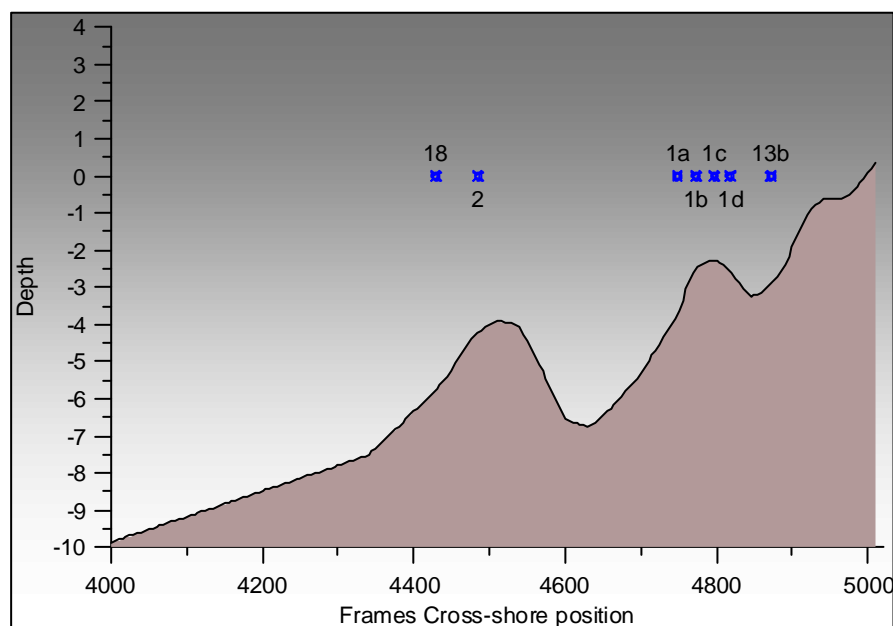


Figura 4.19.- Perfil de la playa de Egmond y la localización de los dispositivos 1d, 1c, 1b, 1a y 2.

4.5.3.- Descripción de la campaña de Teignmouth

La pequeña ciudad de Teignmouth está situada en la orilla norte del estuario del río Teign, al sur de Inglaterra, frente al canal de la Mancha. Tiene un pequeño puerto comercial que debido a su ubicación estratégica, tiene mucho tráfico, además de dar abrigo a una flota pesquera local.

La playa de Teignmouth se caracteriza por tener varios espigones, así como un dique construido en 1977. En uno de los costados de la desembocadura del río Teign hay un promontorio rocoso, lo que le da una gran irregularidad a este tramo de costa, acentuada por los bancos de arena que bordean los cerca de 2 km que mide dicha playa (Figura 4.20). El régimen de oleaje de Teignmouth suele ser un *swell* moderado. El régimen de mareas varía de 1.7 m a 4.2 m (mareas muertas y vivas, respectivamente). Durante el mes de marzo de 1999 se midieron las corrientes de marea a una distancia de 1 km de la costa, y se encontraron velocidades del orden de 0.2 a 0.3 m/s. Aparentemente las corrientes tienen una magnitud similar a una distancia de 0.5 km de la costa (Whitehouse & Waters, 1999a,b,c).



Figura 4.20.- Estuario del río Teign, Teignmouth, Devon, UK.

Por otra parte, el estuario es estrecho, con unos 130 m de anchura en la desembocadura. Durante la marea viva, el intercambio de agua a través de la desembocadura produce una corriente cuyo valor en las cercanías del fondo es del orden de 1.5 m/s (Whitehouse & Waters, 1999a,b). Dicha velocidad es suficiente para conservar la profundidad del canal. No obstante, durante la marea menguante se forma un banco de arena en las inmediaciones de la desembocadura que hay que dragar constantemente para permitir la navegación.²

Los objetivos principales de las medidas de campo en la playa de Teignmouth son los mismos anteriormente descritos en las campañas de Egmond. Las razones por las que se escogió la playa de Teignmouth fueron las siguientes:

- i.* Naturaleza altamente tridimensional de la costa debida a la presencia del promontorio rocoso, los bancos de arena litorales y la desembocadura del río/estuario, junto con la presencia de diques de defensa en la playa de Teignmouth.
- ii.* Similitud con otras playas europeas, principalmente de la costa del Este y Sur de Gran Bretaña, de Irlanda del Norte y Este de Francia, así como del norte de España, Portugal y Noruega.
- iii.* Mejorar el conocimiento de los procesos hidromorfodinámicos en playas altamente tridimensionales, que permitan entender mejor las playas con características similares.
- iv.* Validación de modelos numéricos morfodinámicos aplicados a este tipo de playas.

Para realizar las medidas, se establecieron tres transectos para examinar los procesos a lo largo y ancho de la costa (figura 4.21). La disposición de la instrumentación cubría una parte importante de todo el dominio, por lo que de esta manera se consiguieron los datos necesarios para el modelado.

Los dos transectos transversales a la costa – norte y sur- permitieron obtener dos series opuestas, una relativamente en mar abierto al norte y la otra en el área donde se esperaban los efectos más tridimensionales.

El transecto paralelo a la costa se añadió para conseguir información a lo largo de toda la costa.

² Por ejemplo, hubo casos en Diciembre de 1998 y Abril de 1999 en el que algunas embarcaciones requirieron de asistencia marítima para ser remolcadas hacia dentro del estuario al quedarse varadas sobre dichos bancos de arena.

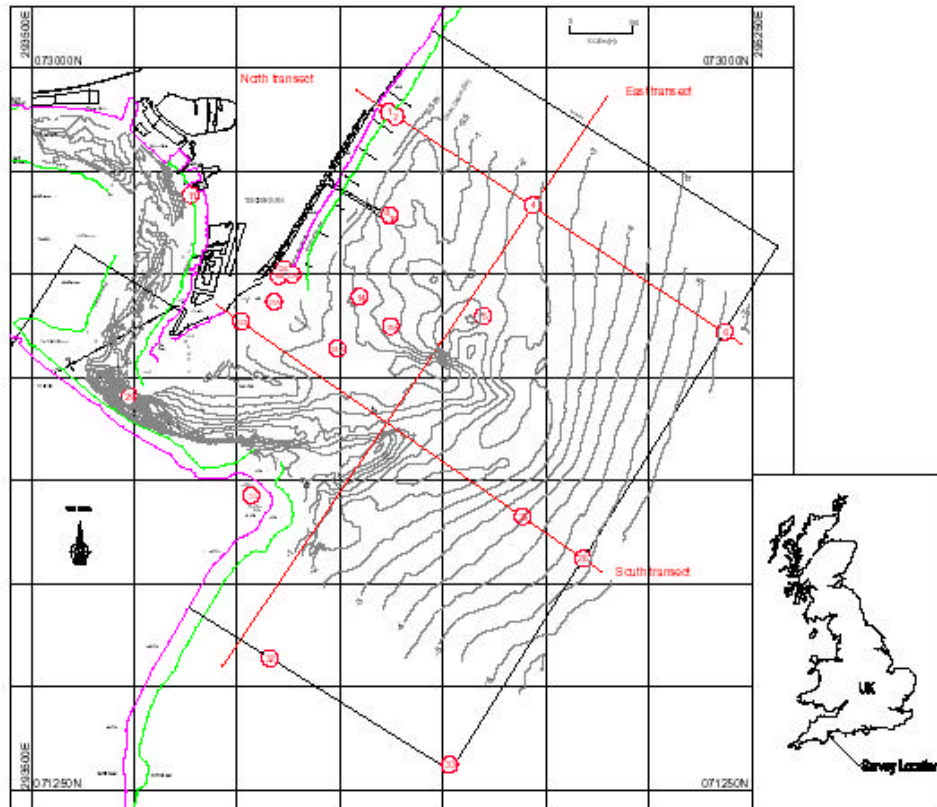


Figura 4.21.- Localización de los instrumentos de medida y transectos de estudio en Teignmouth (Soulsby, 2001).

Las medidas fueron realizadas principalmente por HR Wallingford en colaboración con la Universidad de Utrecht, la Universidad de Plymouth, el Proudman Oceanographic Laboratory y Delf Hydraulics. Los experimentos se centraron en medir principalmente:

- Batimetría.- Se realizaron campañas batimétricas tanto dentro del estuario, como en la zona cercana a la costa, con ecosonda y GPS diferencial. Los datos obtenidos se referenciaron al nivel medio del mar, calibrando los datos con un mareógrafo situado en el dique cercano a la zona de medidas (Whitehouse *et al.*, 1999).
- Morfología del lecho.- Se efectuaron reconocimientos topográficos detallados de la evolución del perfil de la playa, junto con la adquisición de muestras del sedimento (con una draga) y se realizó el estudio granulométrico correspondiente (Levoy *et al.*, 1999).
- Transporte de Sedimentos.- Se realizaron medidas del perfil de velocidades cerca del fondo, junto con datos de temperatura y salinidad. De esta forma es posible estimar el transporte de sedimentos por arrastre de fondo (Whitehouse *et al.*, 1999).
- Datos meteorológicos.- Se instaló una estación meteorológica automática sobre una plataforma del dique, donde se midieron la velocidad y la dirección del

viento, la temperatura del aire, la presión atmosférica y la radiación solar (Whitehouse *et al.*, 1999).

- Nivel del mar.- Se efectuaron medidas del nivel del mar en el dique y en muelle nuevo “New Quay”, situado dentro del estuario. Los niveles para calibrar los datos de estos mareógrafos y su colocación fue determinada por procedimientos topográficos de precisión (Whitehouse *et al.*, 1999).
- Hidrodinámica.- Se realizaron medidas de niveles de agua por medio de sensores de presión de microondas, correntímetros tipo S4 (descritos anteriormente en el apartado dedicado a la campaña Delta’96); trípodes compuestos con 3 correntímetros electromagnéticos, 3 OBS que miden las concentraciones del sedimento en suspensión, un sensor de presión y 2 correntímetros S4; y un equipo denominado SLOT, compuesto por un sensor de presión y un correntímetro electromagnético, que están sincronizados con un GPS. De esta forma se midió el nivel del mar, las alturas y periodos del oleaje, velocidad y dirección de las corrientes (Whitehouse *et al.*, 1999, Miles *et al.*, 1999, Houwman, 1999).
- Oleaje.- Se midieron las alturas y periodos del oleaje con una boya de oleaje en la estación 26, en el extremo *offshore* del transecto sur (ver figura 4.21).
- Campo y perfiles de corrientes.- El campo de corrientes en la desembocadura del estuario se midió con un ADCP instalado en el barco “Sir Claude Inglis”, que media las corrientes cada hora. También se obtuvieron perfiles de velocidad y dirección de las corrientes cada media hora en los puntos fijos de medida.