

Texto: José María Grassa

Desde mediados del siglo XIX, el estudio teórico del oleaje atrajo a muchos de los mejores físico-matemáticos del momento, que nos han legado un extraordinario marco formal para su análisis. Sin embargo, el estudio aplicado del oleaje en relación con las costas, la navegación y los puertos no se desarrolló hasta mucho más tarde y continúa hoy siendo un objeto de dedicación central para todos los interesados en el aún poco conocido medio marino y su borde costero.

El pasado mes de julio se celebró en Madrid el Congreso Internacional WAVES 2005, dedicado al estudio del oleaje y ondas de largo periodo y sus aplicaciones en las costas, los puertos y la navegación. El Congreso, organizado por el CEDEX y el Instituto de Costas, Océanos, Puertos y Ríos (COPRI) de la Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) con el patrocinio y colaboración de la Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente y de Puertos del Estado, incluyó la presentación de más de 200 ponencias y contó con la participación de 300 especialistas de unos 40 países. Las anteriores ediciones de WAVES se celebraron en Estados Unidos cada cuatro años siendo esta la primera vez que se realiza en otro país.

Los temas tratados en el Congreso han incluido un panorama completo de las diferentes áreas de estudio del oleaje: la medida y análisis de oleaje, los modelos teóricos de descripción del oleaje, las ondas de largo periodo y sus efectos en aguas poco profundas, los modelos físicos y numéricos y los proyectos de colaboración internacional sobre oleaje. Dentro de estos temas generales, algunos son de especial interés para el estudio de las costas, su preservación y su protección: la propia medida y predicción del oleaje, el estudio estadístico de los sucesos extremos, los Tsunamis, la hidrodinámica generada por las olas en la costa y el transporte de sedimentos asociado, el remonte del oleaje en la costa, sus efectos en las estructuras y los daños producidos.

Aunque entre los temas tratados en el Congreso se incluía el estudio de los Tsunamis, el trágico

Tsunami del 26 de diciembre de 2004 en el océano Índico motivó el desarrollo de una sección especial del Congreso dedicada a su estudio: la física del fenómeno, las observaciones sobre el terreno de sus efectos y las lecciones aprendidas en lo relativo a la reducción de sus riesgos. En total, se dedicaron al estudio de Tsunamis 6 sesiones del Congreso con más de 20 ponencias, de las que una mayoría trataban sobre el Tsunami en el Índico.

### PONENCIAS DESTACADAS

Varias ponencias en el Congreso WAVES 2005 han tratado sobre la modelización numérica de la generación del tsunami a partir de los movimientos de los fondos y su propagación tanto en el campo cercano como en el lejano.

Pelinowski y otros han realizado un estudio comparativo del tsunami del 26 de diciembre de 2004 y del de Krakatoa en 1883, que también se propagó por el océano Índico. Estos autores muestran que mientras que en el Tsunami de Krakatoa tenía una longitud de ola característica entre crestas sucesivas de unos 6 Km., comparable con la profundidad, el del 26 de diciembre de 2004 ha tenido una longitud de onda característica de unos 50 Km. de longitud, varias veces la profundidad y por tanto mucho menos dispersivo y potencialmente capaz de generar mayores riesgos a gran distancia. Los registros de ambos tsunamis en la costa de India y de Sudáfrica, muestran claramente este diferente comportamiento. Asimismo, el estudio de la propagación de ambos tsunamis muestra que el de Krakatoa tuvo una baja preferencia direccional mientras que el de 2004 tuvo una fuerte direccionalidad por las razones señaladas.

Watts y otros han empleado un modelo dispersivo de Boussinesq para reproducir la generación y propagación del tsunami a partir de los datos disponibles del movimiento sísmico, obteniendo resultados que se comparan de forma cualitativamente satisfactoria con las observaciones sobre sus efectos. Tradicionalmente se han empleado modelos de ondas largas no dispersivos que pueden exagerar

Una ola producida por el tsunami en Kanyakuman. India, el 26-XII de 2004.  
Foto: Reuters/Cordon Press



mucho las predicciones. A su vez, Vatvani y otros han empleado un modelo general para el estudio de la propagación del tsunami y un modelo anidado de detalle para el estudio de la inundación provocada por el tsunami en Banda Aceh, la zona del noroeste de Sumatra más directamente castigada por el tsunami. Durante las horas iniciales de su propagación, el tsunami fue registrado casualmente por diversos altímetros radar en satélites (TOPEX/POSEIDON, ENVISAT y GEOSAT) lo que proporciona por primera vez este tipo de datos que pueden ser empleados en la validación de gran calidad de modelos de tsunamis; los autores los han empleado en este caso para, mediante simulación inversa, establecer unas condiciones iniciales de propagación del tsunami. El modelo anidado de inundación en la zona de Banda Aceh muestra un buen acuerdo entre las alturas de inundación calculadas y observadas tras el tsunami. Asimismo el modelo proporciona estimaciones de las velocidades de flujo en las zonas inundadas, con valores que llegan a alcanzar hasta 6 m/s en algunos de los puntos de medida.

### **OBSERVACIONES EN EL TERRENO TRAS EL TSUNAMI**

Varios de los ponentes participantes en WAVES 2005 han presentado también comunicaciones relativas a campañas de

observación en el terreno en las diferentes zonas geográficas afectadas, de gran utilidad para complementar e interpretar las imágenes de satélite disponibles. Estas observaciones hacen referencia al alcance de la inundación, máxima penetración horizontal del agua y a su remonte en la costa, datos de gran importancia para la comprobación de modelos de predicción de tsunamis, así como a los efectos del tsunami en el propio medio natural, en las infraestructuras y en las edificaciones.

Dalrymple y Kriebel han estudiado los daños en diversas zonas turísticas de Tailandia, entre otros la playa de Patong, donde la altura de remonte fue de 6 metros y Khao Lak donde alcanzó 11 metros y la isla de Phi Phi Don, donde alcanzó 6 metros de altura sobre un istmo cuya cota es de 1.5 metros sobre el nivel del mar con resultados especialmente catastróficos. Dentro de la masiva destrucción registrada, los autores destacan la supervivencia de edificios de hormigón armado, especialmente aquellos con estructuras elevadas ó con grandes áreas de puertas y ventanas en su planta baja que se rompieron permitiendo el flujo del tsunami. En los casos en los que plantas superiores de estos edificios quedaron por encima de la cota de inundación, estas constituyeron un buen refugio para las personas. Los autores destacan, en el caso de la playa de Patong,

el efecto beneficioso en la reducción de daños de pequeños muros entre la playa y el paseo marítimo que deflecaron el flujo horizontal de remonte de la ola dispersándolo parcialmente en vertical. Ello puede haber reducido la fuerza del impacto de la ola con los edificios situados tras ellos. De forma similar, los autores reportan el efecto beneficioso de dunas con vegetación que redujeron sensiblemente la cantidad de movimiento de la ola sin sufrir ellas mismas fuertes daños. Aunque se pudiera esperar de un tsunami un importante efecto de erosión de las playas, en muchos lugares se ha constatado que las playas no han sufrido daños persistentes, encontrándose recuperadas poco tiempo después. Los autores piensan que ello puede deberse a la aportación de arena de los lechos de cauces fluviales a la costa durante la fase de descenso de la inundación.

Synolakis y otros autores han estudiado la costa de Sri Lanka, documentando la extensión y altura de la inundación. A su vez, Sannasiraj y Sundar han estudiado la costa de Tamilnadu en India donde se produjeron alturas de remonte de hasta 7 metros. Yeh y otros autores han estudiado también la costa sureste de India, comparando las medidas obtenidas sobre el terreno con resultados de modelos que muestran un buen acuerdo cualitativo. Estos autores han encontrado fuertes socavaciones junto a edificios que per-

manecían en pie, tanto en sus lados de tierra adentro como orientados al mar, haciendo de sus cimentaciones un factor importante para su supervivencia. Fritz y Sinolakis han presentado observaciones relativas a las islas Maldivas, donde los daños fueron significativamente menores que en Sri Lanka pese a la baja elevación de estos atolones (1.5 metros) que implicarían una extrema peligrosidad. Posiblemente los arrecifes de coral que las rodean a una cierta distancia de la costa y los profundos canales entre los atolones han reducido considerablemente el impacto del tsunami, junto a una mayor sensibilización de la población frente a los riesgos del mar.

## SISTEMAS DE ALARMA

Un buen número de ponencias en WAVES 2005 han estado relacionadas con sistemas de alarma y sus componentes. Por ejemplo, Poplawsky y Khramushin han presentado una metodología para la ubicación óptima de sensores de nivel del mar en el océano Indico en el marco de un futuro sistema de alerta. Goring ha destacado la importancia del empleo de la información ya existente para sistemas de monitorización: la mayoría de los puertos del mundo disponen de sistemas de registro de mareas como parte de sus sistemas de operación y eventualmente estos datos podrían hacerse disponibles generalizadamente a través de Internet, ajustando en su caso

**En total, se dedicaron al estudio de tsunamis 6 sesiones del Congreso con más de 20 ponencias, de las que una mayoría trataron sobre el tsunami en el Índico**

*El Congreso Internacional WAVES 2005, se dedicó al estudio del oleaje y ondas de largo periodo y sus aplicaciones en las costas, los puertos y la navegación.*






*Efectos del Tsunami en la cadena de islas Andanian y Nicobau, India el 28 -XII-2004. Foto: Reuters.*

las frecuencias de muestreo a valores más reducidos. Obviamente, la información registrada en un puerto no es de utilidad para la alarma en esa ubicación, pero lo es para zonas costeras distantes cientos ó miles de kilómetros. La integración de estos datos en sistemas de alarma podría ser de extraordinaria utilidad (con un coste casi nulo) en la comprobación de los modelos de propagación y en su ajuste sucesivo. A su vez, Barrick y otros han analizado las posibilidades de emplear radares marinos de largo alcance en costa para detectar las corrientes generadas por tsunamis. Bencivenga y otros describen el sistema METAS, sistema de alerta de tsunamis en el mediterráneo en fase de desarrollo en Italia por parte de la Agencia para la Protección del Ambiente y Servicios Técnicos, que se basa en el sistema DART de la NOAA para la detección temprana de tsunamis. El sistema se basa en sensores de presión colocados en el fondo del mar en aguas profundas y conectados con una boya de comunicaciones en superficie que transmite los datos de elevación en tiempo real al centro de control a través del sistema INMARSAT, desde el que la se distribuye a las autoridades correspondientes. Los autores destacan el valor especial de estos sistemas en aguas profundas para la alerta más temprana posible dadas las dimensiones del Mediterráneo que pueden conducir a tiempos de preaviso muy reducidos.

En relación con el empleo opera-

tivo de las medidas en el mar aplicado a sistemas de alarma, Korolev y Zaitsev ponen de manifiesto las limitaciones de métodos de predicción basados exclusivamente en datos sismológicos, que dan lugar a numerosas falsas alarmas y proponen un método para la integración en los sistemas de predicción de estas medidas directas del tsunami. A su vez, Annunziato ha presentado un modelo muy elemental de propagación de tsunamis que ha sido instalado en el JRC y puede ejecutarse por cualquier usuario a través de Internet accediendo a una página Web. El modelo calcula los tiempos de llegada del tsunami asumiendo una fuente puntual.

### CONCLUSIÓN

Pese al nivel de conocimiento y desarrollo tecnológico disponible hoy en día, se ha podido producir un desastre que hubiera sido notablemente aliviado con un adecuado sistema de alarma y una apropiada educación de las personas que viven en las zonas expuestas a estos riesgos. La colaboración entre sismólogos y oceanógrafos con el soporte de equipos de medida y sistemas de análisis en tiempo real adecuados puede hacer posible determinar con suficiente precisión cuando y con qué niveles de riesgo van a verse afectadas las diferentes zonas de costa. Ello requiere sin duda una aproximación basada en la cooperación internacional dado el carácter global de este riesgo. 

**El Congreso Internacional WAVES 2005, dedicado al estudio del oleaje y ondas de largo periodo y sus aplicaciones en las costas, los puertos y la navegación, incluyó la presentación de mas de 200 ponencias y contó con la participación de 300 especialistas de unos 40 países**