

LA CATÁSTROFE DEL BUQUE *PRESTIGE**

EMILIO LORA-TAMAYO D'OCÓN

INTRODUCCIÓN

El hundimiento del buque *Prestige* y las consecuencias del vertido de su carga, accidente cuyos ecos perduran y sus consecuencias están todavía presentes, es sin duda un caso paradigmático de emergencia y catástrofe, en el que la intervención y la respuesta científicas resultaron imprescindibles, tanto para analizar el problema, como para plantear actuaciones y explicar a la sociedad la situación desde el conocimiento y el método científico. Estos aspectos deben estar muy presentes también en el análisis de las causas directas y remotas e impregnar las políticas dirigidas a eliminar los riesgos de que se repitan esas mismas catástrofes.

Este capítulo detalla el papel del Comité Científico Asesor para el *Prestige*, creado a las tres semanas del hundimiento. El Comité tuvo, entre otras misiones, la de coordinar y proponer iniciativas y actuaciones científicas, que se materializaron desde el momento del hundimiento, a cargo de investigadores de los Centros Públicos de Investigación (Universidades y OPIs).

No entraremos en las causas del accidente ni en la gestión de sus efectos y consecuencias, en la que posiblemente se pueden identificar ahora aciertos y errores. En

* Este capítulo ha sido publicado previamente en el libro *El conocimiento Científico como referente político en el Siglo XXI*. Editor: César Nombela Cano-Fundación BBVA, 2004, ISBN: 84-95163-89-6.

la historia de la catástrofe hay sin duda muchas facetas y esta contribución pretende centrarse en algunas de ellas, las que aporten información para la inevitable reflexión que planteamos y que fundamentalmente corresponden a los papeles del Comité Científico Asesor y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, que estuvieron íntimamente ligados. Por supuesto que este último no fue el único Organismo que se aproximó científicamente a la catástrofe, pero es de justicia reconocer que jugó un papel muy importante durante los primeros meses del problema.

Los dos papeles han pretendido responder a cuestiones que en aquellas circunstancias críticas estaban sin resolver. En algún caso todavía hoy se sigue trabajando para resolver algunas de las cuestiones inicialmente planteadas. Entre ellas podemos citar las siguientes: ¿Cuánto está vertiendo el *Prestige*?; ¿cuánto tiempo va a durar ese vertido?; ¿qué se puede hacer para evitarlo?; ¿qué daños ha causado en la zona próxima al hundimiento?; ¿qué daños ha causado y causará a la pesca del banco de Galicia y zonas próximas?; ¿qué pérdidas ha causado en el marisqueo y pesca litoral de las zonas afectadas?; ¿cuánto tiempo tardará en recuperarse la biodiversidad y las poblaciones de especies comerciales?; ¿se puede acelerar esa recuperación por medio de la repoblación o de la bio-remediación?; ¿durante cuánto tiempo no se podrán consumir los productos de la zona?; ¿cuáles son los criterios de seguridad alimentaria que hay que adoptar?

EL PAPEL DEL COMITÉ CIENTÍFICO ASESOR EN LA CATÁSTROFE DEL *PRESTIGE*

El problema

El petrolero *Prestige* de 243,5 metros de eslora, se construyó en 1976 con arreglo a la regulación anterior al convenio internacional MARPOL 73/78 (Prevention of Marine Pollution from ships) y con un solo casco. Sus más de 25 años de vida, en la que se alternaron los periodos de navegación con los de mantenimiento, terminaron un 19 de noviembre del año 2002 a más de 100 millas al oeste de la costa gallega, afectando trágicamente el entorno medioambiental inmediato y lejano.

El buque había zarpado el 7 de noviembre del puerto letón de Ventspils en dirección sur, con una carga máxima de 76.973 toneladas de fuel pesado del tipo M-100¹. A las 14 horas y 15 minutos del 13 de noviembre de 2002, emitió una señal SOS de peligro indefinido, desde una posición situada a unas 30 millas del cabo Finisterre que, en ese momento, soportaba olas de 8 metros de altura. A los dos minutos, emitió un «mayday» en el que se pedía el rescate de la tripulación porque, según quedó

¹ M-100 en terminología rusa, equivalente al n° 6 en terminología anglosajona o al n° 2 en terminología francesa.

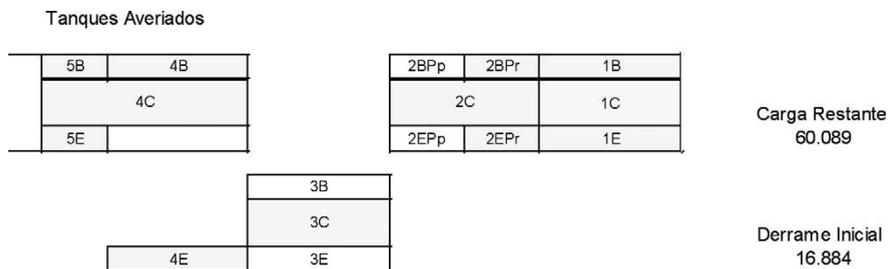


Figura 1. Esquema de posición de los tanques del *Prestige* y de su estado de carga declarado (los tanques 1B, 1E, 2BPp, 2EPp, 2C, 3C, 4B, 4C, 4E, 5B y 5E son los que contenían fuel oil). La parte central «desgajada» es la que se perdió en el momento del hundimiento.

registrado, «...el barco está muy escorado y tiene riesgo de hundimiento...». Con este incidente comienza la catástrofe. Al parecer una fisura en el costado de estribor provocaba la pérdida de fuel-oil, que ya ese mismo día podía advertirse en inspecciones aéreas.

Finalmente, tras varias jornadas de remolque, el buque se partió en dos a las 7:00 del día 19 de noviembre de 2002. Casi cuatro horas más tarde, a las 10:45 se hundió la popa a los 42° 12,6' N y 012° 03,0' W y el mar se tragó la proa a las 15:18, a los 42° 10,8 N y 012° 03,6' W.

La rotura del buque afectó aparentemente a cuatro tanques (3B, 3E, 3C y 4E) de los que en principio solamente dos contenían fuel-oil (3C y 4E), tal como esquematiza la Figura 1.

Al iniciarse el hundimiento, las zonas de la rotura, tanto de la parte de proa como de la parte de popa, quedaron mirando hacia el fondo marino, adoptando ambas una posición casi vertical porque estaban vacíos los espacios de lastre, los piques de proa y popa y la cámara de máquinas. En su proceso de descenso estos espacios se fueron inundando de agua, lo que sin duda cambió la posición de los centros de gravedad de ambas partes, que giraron sobre sí mismas, apuntando al fondo con la zona de proa y la de popa respectivamente. Ello hizo que ambas zonas sufrieran un impacto de fuerte intensidad con el fondo, perdiéndose el timón, dañándose la zona del codaste, deformándose la proa y originándose una onda de presión, ayudada por los efectos inerciales de la maquinaria, que pudo romper algún mamparo de separación de los tanques y provocar desde el fondo marino un nuevo vertido masivo, directamente desde algún tanque dañado o indirectamente por inundación de la cámara de máquinas con el fuel-oil de los tanques de la parte de popa.

Este pecio tocó fondo a 3.565 metros de profundidad después de haber resbalado por una pendiente del 30% en las estribaciones del Banco de Galicia; por su parte, el de proa yace a 3.830 metros en una superficie mucho menos inclinada. Las variaciones de localización son pequeñas con respecto al punto del hundimiento: 42° 10,6' N

y 12° 03,8' W la popa y 42° 12,37' N y 12° 02,93' W la proa. A esas profundidades las condiciones son peculiares: la temperatura es de 2'6° Celsius, la presión es de 365-393 atmósferas, la concentración de oxígeno es de 5,4 ml/l y la presión parcial de CO₂ es de 0,1 atm.²

Debido a que la sismicidad de la zona es moderada, al buen asentamiento de ambas partes del buque en el fondo marino y a encontrarse la estructura equilibrada en cuanto a cargas se refiere, muy inferiores a las cargas de diseño de la estructura, los dos pecios se encuentran en una situación estable con baja probabilidad de alteración a medio plazo³.

El producto

La carga que llevaba el *Prestige* era fuel-oil pesado de tipo M-100, un derivado del petróleo obtenido como fase residual en su proceso de destilación, con una densidad a 15°C de 992,1 Kg/m³ y a 2,6° C de 1.012 Kg/m³ (nótese que la densidad del agua del mar a 3°C es de 1.045 Kg/m³). Su composición era C, 85,8 %; H, 11 %; S, 2,28 % (22% Hidrocarburos saturados, 50% hidrocarburos aromáticos, 28% resinas / asfaltenos)⁴. Se trata, pues de un residuo de destilación tipo naften-aromático, que emulsiona fácilmente en el mar con contenidos de 45-50% de agua y se calcula que tiene unas pérdidas por evaporación y disolución en dos meses, inferiores al 5%. Como muchos otros factores, la biodegradabilidad no era conocida en ese momento aunque se estimó inferior al 10% en los primeros meses. Otro dato de primera importancia para valorar la capacidad del fluir el fuel-oil, es la viscosidad⁵ (dinámica y cinemática):

T (°C)	mPa·s	ν (m ² /s)
0	1.400.000	1,38
3,12	500.000	4,94x10 ⁻¹
5,25	300.000	2,96x10 ⁻¹
10,25	160.000	1,58x10 ⁻¹
15,25	45.000	4,45x10 ⁻²
20,12	19.500	1,93x10 ⁻²
50	850	8,40x10 ⁻⁴

Tabla 1. Viscosidad del fuel oil del *Prestige* en función de la temperatura

² CCA Prestige: «Informe preliminar sobre la corrosión del casco», Madrid, Enero 2003; <http://www.ccaprestige.es>

³ CCA Prestige: «Informe preliminar sobre la sismicidad en la zona del SW de Galicia», «Nota sobre la estabilidad del pecio», Madrid, Diciembre 2002; <http://www.ccaprestige.es>

⁴ <http://csicprestige.iim.csic.es>.

⁵ <http://www.ciemat.es>, obtenida del <http://www.le-cedre.fr>

La reacción. Primeros pasos

Ante la catástrofe, la reacción en el plano científico se produjo en tres fases consecutivas. En primer lugar se puede hablar de una reacción «científica sin coordinar». Esto es, debido al interés que al investigador le produce cualquier situación fuera de lo normal, así como a la responsabilidad social de la que es consciente, hubo grupos más o menos institucionalizados que se pusieron a trabajar, recogiendo muestras, analizando los restos de fuel-oil y haciendo acopio de información. Se pueden citar, como reconocimiento a su trabajo, los esfuerzos de investigadores de Le Cedre (Francia) con el Instituto de Química Ambiental (IQAB-Barcelona) del CSIC, los investigadores del Instituto de Investigaciones Marinas (IIM-Vigo), también del CSIC y varios profesores de universidades gallegas. Es preciso resaltar que algunas de sus actuaciones llevan fecha de 19 de noviembre (recogida y análisis de muestras, valoración puntual de daños en aves y organismos marinos,...). En conclusión, los científicos trabajaron desde el primer momento, si bien hay que reconocer que en algunos casos de forma no suficientemente coordinada con las administraciones implicadas *in situ* en la zona afectada.

En segundo lugar, para coordinar todas las actuaciones (y no solo las que afectan al plano científico), el Gobierno constituyó una «Comisión Interministerial para el *Prestige*», presidida por su Vicepresidente Primero y Ministro de la Presidencia. Uno de sus primeros cometidos fue el de encargar a instituciones científicas españolas, en concreto al CSIC y al IEO, el estudio de ciertos aspectos parciales, entre otros los daños en las poblaciones demersales de seres vivos y las trayectorias de la marea negra.

En tercer lugar, se organizó una reacción «científica coordinada». En efecto, el 9 de diciembre de 2002, a iniciativa de la Comisión, se constituyó el «Comité Científico Asesor» (CCA). El CCA informaba y estaba en contacto con la Comisión Interministerial, en concreto con su Presidente, aunque logísticamente estaba amparado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, mas concretamente por la Secretaría de Estado de Política Científica y Tecnológica.

Informar y estar en contacto no quiere decir ser un órgano portavoz. En efecto, desde el primer momento se establecieron y aceptaron tres condiciones o premisas sin las cuales el CCA estimó que no podría trabajar y que rigieron durante todo el período de actuación del CCA. Así, quedó claro que los miembros del CCA serían incorporados en razón de su **competencia** en los temas tratados, ya fuera en su condición de permanentes o invitados. Por otro lado el CCA sería **independiente** para trabajar sin ninguna indicación u orientación, mas que las que se derivaran de la aproximación científica a los temas que rodeaban el problema. Por último, se estableció el criterio de **transparencia** en las informaciones y conclusiones a las que llegara el CCA, con la única salvedad de informar de las mismas en primer lugar a la Comisión Interministerial, para a continuación dar a conocer esa información por los canales mas adecuados (habitualmente prensa y publicación en la web⁶ que se creó con ese fin).

⁶ <http://www.ccaprestige.es>

Las condiciones fueron aceptadas sin discusión y no hubo el menor problema en mantenerlas durante el tiempo en que el CCA fue operativo, de tal manera que la única presión que en todo caso experimentó el Comité y que no fue pequeña, fue la asociada a la gravedad de la situación y la responsabilidad y trascendencia de sus decisiones y recomendaciones. Así las cosas, el análisis y estudio de los pecios para detener el vertido fue el objeto principal sobre el que se concentró inicialmente la atención del CCA, y se convirtió en objetivo secundario la intervención científica en su control, seguimiento, efectos y consecuencias. Debe tenerse presente que nunca el hombre había realizado trabajos de reparación / mantenimiento a la profundidad en que estaban los pecios y que por ello se trataba de un desafío científico y técnico sin precedentes.

Participaron como miembros permanentes en el CCA, 7 investigadores del CSIC (biólogos, químicos y físicos), 4 profesores de Escuela Superior de Ingenieros Navales (Universidades de Coruña y Madrid), 2 directivos de la empresa IZAR (dirección de reparaciones y de innovación), 1 investigador de IFREMER y otro de Le CEDRE (instituciones francesas), 1 investigador del IST (Instituto Superior Técnico de Lisboa), 1 investigador del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration de EE.UU.), 1 investigador del CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas y Medioambientales) y 1 investigador del IEO. Además colaboraron de forma puntual 2 investigadores del Instituto de Investigación en Química Ambiental de Barcelona (IIQAB) del CSIC, uno de ellos destacado desde el CCA en el «Grupo de estudio y seguimiento epidemiológico de los efectos sobre la salud a raíz del vertido del *Prestige*», creado en el Ministerio de Sanidad y otro comisionado desde el CCA en EE.UU. para analizar el estado de la tecnología americana en recuperación y tratamiento de vertidos, aceptando así una oferta de colaboración americana.

Es importante destacar la gran dedicación de todos los miembros del CCA, que durante los dos meses largos que duró su tarea tuvieron disponibilidad total de su tiempo y dejaron aparcadas otras obligaciones profesionales y personales.

El primer paso que dió el CCA fue valorar la situación porque ya existían algunos datos fidedignos. La Comisión Interministerial para el *Prestige*, había aceptado el ofrecimiento de inspeccionar la zona de los pecios utilizando el *Nautilé* y su buque nodriza, el *Atalante*, que la sociedad GENAVIR, del IFREMER (Instituto Francés para la Investigación Marina), había realizado a los pocos días del hundimiento. El *Nautilé* es un batíscafo tripulado (hasta 3 personas), capaz de descender a profundidades máximas de 6.000 metros, provisto de un pequeño ROV⁷ y de capacidad de manipular muestras utilizando dos brazos robotizados. El día 1 de diciembre el *Atalante* zarpó de Vigo en dirección a la zona del hundimiento, llevando ya a bordo algunos investigadores, dos de los cuales formaron parte posteriormente del CCA. El 2 de diciembre de 2002 fue localizada la proa del barco y el día 7 la popa, que estaba a 2 millas de la proa. Concluido el trabajo, volvieron a Vigo.

⁷ Remotely Operated Vehicle. Ver web de IFREMER-GENAVIR: <http://www.ifremer.fr/genavir/>

El 10 de diciembre, el recién creado CCA pudo analizar los datos aportados por esta campaña de localización de los pecios. Con los pocos datos de la misma se estimó que había 14 fugas de distinta naturaleza (9 en proa y 5 en popa), por las que se perdía un **caudal del orden de 125 Tm.** diarias. Inmediatamente y a través de los cauces establecidos (Comisión Interministerial), el CCA recomendó que el *Nautile* volviera a sumergirse para, en primer lugar, **medir la temperatura** de salida del fuel-oil y, a continuación, **ensayara la obturación experimental**, siquiera provisional, de una de las fugas detectadas, con objeto de valorar la viabilidad de disminuir las pérdidas. Aunque el estado del mar no era muy favorable para las inmersiones del batíscafo, entre el 11 y el 16 de diciembre el *Nautile* pudo bajar al pecio en dos ocasiones, recoger muestras de las fugas, tomar la temperatura en una de ellas (10,5° C⁸ el 12/12/02) y ensayar con éxito la obturación de la n° 3, correspondiente a la bita de proa-estribor, utilizando un disco de aluminio lastrado con granalla de acero.

Primera fase de Neutralización: Obturación de fugas

La vuelta a puerto del *Atalante* – *Nautile* con esos resultados dejó claro que si bien la pérdida de temperatura asociada a la termalización del pecio iba a favor de un aumento de la viscosidad y por ello de una eventual reducción de los caudales de fugas, su volumen y número hacía prioritario y urgente, antes de pensar en soluciones de neutralización definitivas, obturar siquiera provisionalmente todas las que se pudiera, con la máxima eficiencia posible, lo cual se había demostrado realizable gracias al «experimento» realizado por el *Nautile*. La valoración de las fugas y la solución teórica de obturación provisional que se proyectó para cada una de ellas, permitió fijar como objetivo que quedara una pérdida residual máxima (popa y proa conjuntamente) **inferior a 10-12 Tm. por día.**

Se planteó entonces **el dilema**: comisionar al *Nautile* (vehículo de observación con cierta capacidad experimental y dificultades asociadas al clima) para esa tarea, o bien confiar en las propuestas que estaba recibiendo el CCA por parte de compañías *off-shore*, para emplear en esa tarea un ROV industrial de trabajo, como los utilizados en prospecciones petrolíferas en el mar o en el tendido de cables submarinos. Cada una de las alternativas tenía sus ventajas e inconvenientes. El *Nautile*, por ejemplo, ofrecía experiencia probada de observación a profundidades mayores de 4.000 m, disponibilidad inmediata (estaba fondeado en el puerto de Vigo), conocimiento del pecio y había tenido éxito en la obturación experimental. Sin embargo, adolecía de algunos inconvenientes: si las olas eran superiores a tres metros, no podía operar

⁸ Es habitual que los petroleros transporten la carga de productos muy densos / viscosos a temperaturas del orden de 50° C para facilitar su carga / descarga. El que en salida de una fuga se midan 10° C de temperatura al cabo de más de 20 días de estar la carga rodeada de agua a 2,6° C, da una idea de la baja conductividad calorífica del fuel-oil de los tanques.

y su capacidad de trabajo no sobrepasaba los límites de lo experimental. Por otro lado, el ROV se podía emplear las 24 horas del día con cualquier situación del mar. Además, estaba acostumbrado a operar en el fondo marino. Su experiencia se veía garantizada por tratarse de empresas auxiliares de potentes petroleras y, en fin, se comprometían a estar sobre el pecio en tres semanas.

En ese momento no se sabía que no había ninguna experiencia en trabajos de ROV a más de 3.000 metros y posteriormente, a lo largo del mes de enero, durante el análisis de las soluciones de neutralización definitiva, el CCA constató que por problemas técnicos no había ningún ROV capaz de trabajar a la profundidad de 4.000 metros que se requería⁹ (lo había sin embargo para tareas de observación). Por ello la decisión que tomó el CCA el 18 de diciembre, de encomendar el trabajo al *Nautile*, se reveló crucial para concluir con éxito las tareas de obturación provisional, hasta dejar una **fuga residual inferior a 2 Tm. diarias**, el 13 de febrero de 2003.

El día 19 de diciembre el *Nautile* comenzó a trabajar en popa y al día siguiente en proa con un fin: eliminar estachas y restos que impedirían el libre acceso al pecio. Durante esa tarea se detectaron otras 6 fugas nuevas, lo que además de constituir una mala noticia, suponía que el **caudal de fuga debía sin duda ser superior a las 125 toneladas diarias, estimadas en un principio**.

A pesar de haber programado que el submarino tomara muestras y leyera la temperatura en varias fugas a lo largo de las campañas, la presión de las circunstancias hizo que desde el CCA se diera prioridad absoluta a la obturación de fugas. A ello dedicó el trabajo del *Nautile*, en las siete campañas de su actuación que totalizaron 46 días de trabajo hasta el 15 de febrero de 2003, durante las que se efectuaron 106 horas de inmersión (la media de cada inmersión era de 4 horas). Además, el rendimiento de uso del *Nautile* (días de trabajo posibilitado por el clima) fue del 56% (43% si se incluyen los días de avituallamiento en Vigo). Las técnicas de obturación seguidas fueron distintas, según el tipo de fuga:

- **Tapas de escotilla:** Cierre completo de la tapa girando el volante de cierre.
- **Escotillones con tapa de bisagra:** Recolocación de la tapa y afirmado con sacos de granalla de acero.
- **Grietas en cubierta:** Colocación de sacos impermeabilizados, lastrados con granalla / barita.¹⁰
- **Registros abiertos:** Tapa de acero con brazos articulados ajustables.
- **Bitas en proa:** Campana lastrada con sacos de granalla de acero.
- **Válvula de regulación de gas inerte en proa:** Saco de lona especial ajustado por la parte inferior.

En todas las campañas participaron investigadores y técnicos españoles, en concreto a bordo del buque *Atalante* y en contacto directo con el CCA, 9 personas del

⁹ De hecho la mayor dificultad radica en un rediseño del «umbilical» que une el ROV al barco nodriza. Ese problema y otros menores, han sido finalmente resueltos por la industria, aunque no ha sido sino hasta la primavera del 2003.

¹⁰ Sulfato de Bario.

CSIC (del Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo y de la Unidad de Tecnología Marina con sede en Barcelona), 1 persona del IEO, 2 personas de la Universidad de Vigo, 1 persona de la Universidad de la Coruña (El Ferrol) y 3 personas de IZAR. Algunas de ellas eran miembros del CCA, que además se sumergieron en el *Nautilo* en calidad de observadores, sobre todo durante los últimos días de operación (1ª quincena de febrero) con objeto de validar, desde el CCA, el estado final de cada fuga.

Estructuración de las tareas del Comité Científico Asesor

Las actuaciones del CCA pueden dividirse en dos bloques: las que le fueron encomendadas que denominamos «reactivas» y las que el CCA propuso realizar que podemos calificar de «proactivas». Serían, por mejor decir, los «encargos recibidos» y las «recomendaciones e iniciativas propuestas». Las actuaciones reactivas se centran en torno a un mandato único: neutralizar el vertido del *Prestige*, tarea que a su vez, se dividió en dos fases, la primera dirigida a contener las fugas para dar tiempo a la consideración, el diseño y el desarrollo de la segunda: estudio del pecio y propuesta de la metodología que habría de seguirse para neutralizar definitivamente los pecios y conjurar el peligro de un vertido del fuel-oil que quedaba en los tanques.

Por su parte, las «proactivas» fueron surgiendo a medida que los análisis y las valoraciones del CCA lo encontraron pertinente y a grandes rasgos, fueron:

- Creación de un Grupo de Oceanografía Operacional para el seguimiento y predicción de las trayectorias de los vertidos.
- Constitución de un «Operativo de seguimiento analítico» de las manchas de fuel-oil.
- Análisis de la acumulación de fuel-oil a media profundidad y en fondos marinos.
- Estudio de sismicidad y calidad de los fondos en la zona de los pecios.
- Estudio de la corrosión de los restos hundidos.
- Modelo térmico de los tanques con su carga de fuel-oil.
- Análisis primario de la posibilidad de emplear métodos de biorremediación para la eliminación del fuel-oil.
- Informes sobre limpieza de zonas rocosas.
- Diseño de un Programa de Intervención Científica (PIC) sobre la catástrofe.

Neutralización de los pecios. Fase II

Iniciada la dinámica de neutralización de los pecios en su Fase I, correspondiente a la obturación provisional del máximo número de fugas, el trabajo de carácter reactivo del CCA relativo a la neutralización inició su segunda fase, centrándose en el análisis de las posibles soluciones del problema que tuvieran un carácter más definitivo. El carácter provisional de las obturaciones que se estaban realizando en la

Fase I permitían no solo el estudio del problema en condiciones de mayor sosiego, sino tener unas perspectivas de durabilidad razonables. A pesar de ello, la sola consideración de alguno de los problemas o complicaciones potenciales que el devenir del tiempo podía producir (como la corrosión del casco o la existencia de un riesgo de sismicidad moderada), hacía necesario plantear un estudio de soluciones con carácter definitivo. Sin embargo el CCA fue pronto consciente de la dificultad del problema derivada de las condiciones extremas de situación de los pecios: nunca se había abordado una situación de esa naturaleza a tal profundidad. Por lo tanto se estaba ante un autentico desafío al estado del conocimiento y la técnica, que traía consigo un evidente y altísimo riesgo de fracaso, derivado precisamente de esa naturaleza. Se necesitaban soluciones sencillas y contrastadas con otras experiencias anteriores (que no existían en esas condiciones) o extrapoladas a partir de ellas; que pudieran acometerse en el menor plazo posible; que redujeran al máximo, durante su puesta en marcha, los riesgos de contaminación a corto y largo plazo; y se veía necesario también, en la fase operativa, una gestión empresarial con capacidad y experiencia en integración de tecnologías, ya que no había ninguna de ellas capaz por sí sola de resolver el problema. En todos los estudios de soluciones no se tuvo en cuenta el factor económico, porque se consideró que en ese momento era secundario y hay que decir que el CCA nunca recibió la menor indicación, mucho menos presión, para tenerlo en cuenta.

En principio se analizaron 3 líneas de actuación distintas:

- Dejar el fuel-oil en el lugar del hundimiento.
 - No realizar ninguna actuación sobre el pecio: Confiar en la máxima durabilidad de la Fase I de neutralización (obturbación provisional de las fugas).
 - Confinar los pecios en sarcófagos, cofres, o recintos capaces de contener potenciales escapes.
 - Neutralizar el fuel por desnaturalización.

Año	Barco	Profundidad	Actuacion realizada	Localización
1628	<i>Vasa</i>	30 metros	Reflotado (por cable) en 1960 y llevado a 15 m. de profundidad donde se restauró	Archipiélago de Estocolmo
1968	<i>K-129</i> , submarino ruso de clase Golf	5.000 metros	Sin confirmación oficial: en 1974 el Hughes Glomar Explorer, desde superficie, recuperó 11 m. de la proa	Hawai
2000	<i>Kursk</i> , submarino nuclear ruso	108 metros	El submarino fue izado a una posición debajo de la barcaza Giant 4 y transportado a dique, en octubre 2001	A 90 millas de la base de Murmansk
2001	<i>Ehime Maru</i> , BIO Japonés	600 metros	Hundido tras colisionar con submarino USA emergiendo. Reflotado hasta 30 m. para recuperar cadáveres	Hawai

Tabla 2. Algunos casos de reflotamiento /extracción de pecios

- Extraer el fuel-oil.
 - Reflotar las dos partes del pecio.
 - Extraer la carga sin control y recogerla en superficie.
 - Extraer la carga de forma controlada.
 - Procesamiento continuo (exige la instalación de un *riser*¹¹).
 - Procesamiento *batch* (o por lotes), que no necesita *riser*.
 - Reflotar las dos.

La consideración obvia de que la carga de fuel-oil extraída no daría nunca problemas mientras que una carga confinada o enterrada podía suponer a la larga un problema de contaminación, estuvo presente en todas las deliberaciones y fue un factor crítico a la hora de explorar con una mayor intensidad las posibilidades de extracción definitiva.

El reflotamiento o extracción del buque entero, tenía antecedentes de éxito. La Tabla 2 resume algunos casos de reflotamiento / extracción de pecios

En todos ellos la profundidad era menor que en el caso del *Prestige*. Además en nuestro caso los daños estructurales no permitían confiar en la integridad del pecio durante la operación de reflotamiento, con el consiguiente peligro de contaminación masiva.

El reflotamiento puede plantearse mediante distintas técnicas¹², tales como flotadores, izado por cables, barcasas, etc. Existía el antecedente inmediato del *Kursk*, extraído el año 2000 desde 108 metros de profundidad. Ahora bien, para que un reflotamiento tenga éxito, se requiere que la estructura sea resistente; que previamente se haya liberado el máximo de la carga de sus depósitos y, en el otro lado de la balanza, el riesgo de contaminación es muy elevado.

La extracción no controlada requiere el desarrollo de una tecnología de voladura controlada bajo presiones de 400 atmósferas. Eso, unido al riesgo de dispersar el fuel-oil hacen ese método muy poco aconsejable.

La extracción controlada tiene algunos antecedentes inmediatos, aunque a profundidades mucho menores, cómodamente accesibles:

- *Ievoli Sun*: en abril-mayo de 2001 se recuperaron por bombeo 4.000 Tm. de estireno y fuel-oil, del buque hundido en el Canal de La Mancha a 95 metros. Se usaron ROV's y tecnología de «hot tapping»¹³.
- *Erika*: Extraídas 11.000 Tm. de fuel-oil por bombeo en el verano del 2000, del pecio hundido a 125 m. (costa de Bretaña francesa). Por sus características es el modelo mas parecido al caso del *Prestige* (salvando el problema de profundidad).

¹¹ El *riser* es la estructura de canalizaciones que, verticalmente, debe unir el punto de operación en una prospección petrolífera en el fondo del mar, con la superficie donde están los buques de control y carga

¹² De cualquier forma hay que tener en cuenta que el «peso en rosca, en seco» de la estructura es del orden de 7.000 Tm. la popa y 6.000 Tm. la proa, al que hay que añadir el de la carga de fuel-oil remanente.

¹³ Perforación de un depósito (natural o artificial) que contiene crudo, para instalar una válvula que permita la extracción bajo condiciones controladas.

En general el análisis de cada solución se hizo teniendo en cuenta variables importantes: antecedentes a esas profundidades y experiencia probada, tecnologías implicadas, plazo de ejecución estimado y riesgos potenciales inherentes a la operación.

La reflexión sobre el «confinamiento» arrojó una serie de datos definitivos. En primer lugar se necesitaban ROV's capaces de operar a profundidades del orden de 4.000 m., lo que requería el desarrollo y validación de nuevas capacidades sobre esos equipos. El enterramiento con arcilla o grava (técnica conocida como «cubrimiento») necesitaría del orden de 2,5 millones de metros cúbicos para cubrir ambos pecios. El cubrimiento con clatrato ($\text{NaCl-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$) a partir de una inyección de CO_2 , parecía una solución sólida y estable¹⁴ en las condiciones ambientales del lugar donde se encuentra el pecio (temperatura de 2,6 °C, salinidad del agua de 3,49% y una presión de 360 atm.), aunque se trataba de un método aún muy experimental, probado a pequeña escala y del que no se tenía certeza de sus resultados a largo plazo, ya que no ha sido posible demostrar en ningún caso, ni siquiera en los experimentos que ha realizado el Monterey Bay Research Institute (MBARI) de California (EE.UU.), que el clatrato a esas profundidades pueda formar una red tridimensional relativamente rígida y adherida al pecio, sin que se disperse sobre el fondo oceánico.

En cuanto al «sarcófago» es posible pensar en un «cofre» de hormigón, de acero, de resina «epoxy» o de otro material mas o menos hermético, aunque siempre capaz de contener eventuales vertidos que por su flotabilidad tienden a subir. No hay duda de que existe experiencia española en la fabricación de grandes estructuras de estos materiales, así como en su transporte y colocación precisa. La técnica del «hormigón proyectado» también se analizó, pero no había precedentes para ese tamaño y a esa profundidad. La «desnaturalización» o neutralización del fuel-oil por procesos químicos o bioquímicos se podría efectuar por medio de la «polimerización», esto es, la fabricación de materiales poliméricos a partir de monómeros olefínicos, pero no era posible porque se necesitan catalizadores ($\text{AlCl}_3\text{-TiCl}_3$, metalocenos) que no operan en el agua y, además, necesitan altas temperaturas. La «incineración (por combustión)», que podía ser otro procedimiento de desnaturalización, requiere enormes cantidades de aire y combustible (gas) para calentar hasta el punto de ignición (160 °C) y, para más dificultad, los productos resultantes son altamente contaminantes (SO_2). Por otro lado, la «biodegradación» es capaz de eliminar cantidades pequeñas de fuel-oil, pero necesita nutrientes y es relativamente lenta. No obstante existe la experiencia de su uso en la fase final de la catástrofe del *Erika*, para eliminar el fuel-oil remanente, una vez concluida la extracción por bombeo del volumen mas importante¹⁵.

Con respecto a la extracción controlada se pueden considerar dos tipos de métodos. El primero es el de extracción «on line» como proceso continuo de bombeo o de conducción del fuel desde el depósito (tanques del buque) hasta el destino (buque de

¹⁴ Fuente: <http://www.acri.fr/co2/diox-1.htm/>

¹⁵ Se sembraron colonias de bacterias con nutrientes, para facilitar la eliminación de los restos a largo plazo.

almacenamiento en superficie). Requiere de un *riser* y en ocasiones, para rebajar la viscosidad, utilizar algún diluyente como el *ester metilo de colza*. La experiencia inmediata es la del *Erika*. El segundo método es el de extracción «batch» o por lotes: se trata un proceso de extracción, almacenamiento submarino y descarga por lotes, bien usando campanas, paraguas, globos, bolsas, o dispositivos semejantes. Con esta técnica en principio no sería necesario usar el *riser*. El método tiene un pequeño inconveniente para asumir la responsabilidad de ponerlo en marcha: nunca se ha ejecutado, por lo tanto, no existen antecedentes probados¹⁶.

Por lo demás en ambas situaciones se necesita utilizar la técnica «hot tapping» de perforación, extender la capacidad de trabajo de los ROV's hasta 4.000 m y validarla, así como que el fuel pueda fluir a lo largo de algunos metros hasta el contenedor, eventualmente a través de un mezclador de diluyente (problema de viscosidad / adherencia).

La Tabla 3 resume las opciones barajadas.

	Método	Viabilidad primaria	Referencias	Riesgo medioamb.	Plazo estimado	Coste estimado
Confinamiento	Cubrimiento	SI	<i>Pallas</i> 1998 (pocos mts)	Medio	<i>Pallas</i> : 1 año	<i>Pallas</i> : 18 M DM
	Clatrato de CO ₂	NO				
	Cofre hormigón	SI	Ninguna	Pequeño. Necesitado de revisiones	2 años	130 M€
	Cofre metálico	SI	Ninguna	Medio. Necesitado de revisiones	10 meses	100 M€
Desnaturación	Polimerizac.	NO (en el fondo marino)				
	Incineración	NO (en el fondo marino)				
	Biodegrad.	NO (sólo al final)	<i>Erika</i>			
Reflotamiento	Barcazas	Probado a poca profundidad	<i>Kursk</i>	Alto, con los tanques llenos		
	Flotadores	NO probado	Con pecio intacto	Alto, con los tanques llenos		
Extracción	Salida incontrolada	NO		Enorme		
	Extracción por bombeo controlado	SI	<i>Bohlen</i> , <i>Tanio</i> , <i>Yiul 1</i> , <i>Osung 3</i> , <i>Erika</i>	Poco	8 meses	200 M€

Tabla 3.

¹⁶ La compañía OIL STOP LCC, de EE.UU. tiene al parecer una patente sobre los «sub sea oil collector», que no han sido comprobados a las profundidades y en las condiciones *Prestige* (<http://www.oilstop.com>).

El fuel-oil que queda en los pecios

La pérdida total de la carga contenida en los tanques 4E y 3C se produjo entre el instante del accidente y el hundimiento e impacto final con el lecho marino de las dos partes en que quedó dividido el buque, seguido del deslizamiento de la porción de popa sobre el fondo marino. La estructura del tanque 3C, desapareció prácticamente en los procesos de rotura y hundimiento, por lo que desde la avería inicial hasta que tocó fondo, se vertieron al mar **al menos** unas 16.884 Tm. que corresponde a la capacidad de los tanques 4E y 3C.

Tras el hundimiento y una vez detectadas las 20 fugas existentes en ambos pecios, para evaluar el caudal de fuel-oil vertido se procedió al análisis de las estimaciones de velocidad de salida del fuel-oil y sección de las fugas, obtenida de las imágenes de video tomadas en las inmersiones y de los valores de temperatura del fuel-oil obtenidos también por el submarino. Como quiera que entre el día del hundimiento (19 de noviembre) y el del primer avistamiento del pecio (2 y 7 de diciembre para la proa y la popa respectivamente) transcurrieron aproximadamente dos semanas, la cantidad de fuel-oil que se pudo perder por las fugas identificadas se estimó a partir de una ley exponencial que aproxima el caudal en función de la temperatura¹⁷. Para que dicha aproximación diera valores que respondieran a lo que posteriormente se observó, hubo que considerar un comportamiento no newtoniano del flujo.

Uno de los datos más significativos del cálculo de fugas reside en el hecho de que las aberturas para la máquina de limpieza (butterworth) de los tanques 4C y 4B fueron sondadas mecánicamente por el *Nautilé*, el día 26 de enero. El cable de sonda lastrado que se introdujo, de una longitud aproximada de un metro, salió limpio de fuel-oil, lo que permitió asegurar que el nivel de fuel-oil en ese tanque era sensiblemente inferior al supuesto en los cálculos anteriores. Esto hizo que se reconsiderara lo que se creía que quedaba de fuel-oil, corrigiéndose las estimaciones que se tenían hasta esa fecha para la parte de popa del pecio. No podía haber más fuel-oil del que físicamente se puede alojar a popa de dichas tapas abiertas, considerando la escora y el trimado con el que quedó esta parte del pecio tras el hundimiento.

La situación de la parte de popa del pecio sobre el lecho marino es la que se refleja esquemáticamente en la Figura 2. Se encuentra asentada de proa aproximadamente 15° en el sentido popa proa, y entre 12° y 15° en el sentido babor estribor. Con estos datos es posible evaluar la cantidad máxima de fuel que puede quedar retenida en este tanque, en unas 2.400 Tm. Análogamente en el tanque 4B han sido detectados otros registros «butterworth» sin fuga aparente, lo que permite suponer una situación similar de pérdida parcial de la carga, con una cantidad máxima remanente en el tanque de unas 200 Tm.

¹⁷ Es obvio que en el momento del impacto con el fondo marino (debido precisamente a ello) y durante esas dos semanas pudo producirse una fuga masiva que no se corresponde con el «estado estacionario» posterior, en el que se estiman los caudales de flujo.