

Persistencia del fuel enterrado en playas gallegas 7 años después del Prestige

S. FERNÁNDEZ *, A. BERNABEU y D. REY

* *sandrafernandez@uvigo.es ; <http://www.geoma.net/>
Marine and Environmental Group (GEOMA),
Dpt. Geociencias Marinas y O. T.,
Universidad de Vigo, 36310 Vigo, Spain*

RESUMEN

La persistencia del fuel tras una marea negra ha sido ampliamente documentada para diferentes accidentes, fundamentalmente en playas de grava. En el caso del accidente del *Prestige*-POS (2002, España), la mayor parte de las playas afectadas eran arenosas, para las cuales los estudios de persistencia son prácticamente inexistentes.

En este trabajo se realizó un seguimiento en playas afectadas por la POS para su evaluación durante el año 2009, en la zona de la Costa da Morte. Se extrajeron testigos y se tomaron datos topográficos en condiciones de invierno y verano. Durante el procesado de los testigos se encontró fuel enterrado a diferentes profundidades. Las morfologías presentadas fueron: arenas grises, galletas centimétricas y milimétricas (observadas a la lupa). La distribución del fuel fue diferente para cada playa y cada campaña, condicionada por los cambios en las condiciones oceanográficas. Además, se valoró el efecto a medio-largo plazo del ascenso del nivel del mar sobre las playas contaminadas con el consecuente retroceso de la línea de costa. Finalmente, 7 años después del accidente, se sigue detectando fuel en muy baja concentración, lo que revela su persistencia en playas arenosas a pesar de las variaciones hidrodinámicas de corto y largo plazo

Keywords: Galicia, accidente Prestige, playas arenosas, fuel enterrado, ascenso del nivel del mar, regla de Bruun

1 Introducción

Durante los últimos 40 años, las costas mundiales han sufrido numerosos accidentes de petroleros. Cuando este fuel alcanza las playas se genera contaminación superficial, fácilmente eliminada por medios mecánicos; y subsuperficial. En este segundo caso, el fuel se introduce en el sedimento bien por percolación, principalmente en playas de grava; bien por enterramiento, en playas arenosas (Vandermeulen et al., 1979; Bernabeu et al., 2006). La mayor parte de este fuel es eliminado durante los primeros meses o años, debido a los distintos procesos de alteración: evaporación, disolución, oxidación microbológica e incluso eliminación de constituyentes recalcitrantes *in situ* que, en algunos casos, se ven acelerados por la dispersión física debida a la acción de las olas (Wang et al., 2001).

Sin embargo, en algunas costas pueden persistir pequeñas fracciones de fuel durante décadas. Este hecho ha sido documentado por diferentes autores para mareas negras como la del *Arrow* (1970, Canadá), *Metula* (1974, Chile), y *Exxon Valdez* (1989, Alaska), (ver recopilación en Owens et al., 2008) o en la del Amoco Cadiz (1978, Francia) (Gundlach et al., 1983; Page et al., 1988).

En playas de grava, el fuel enterrado por percolación, se acumula sobre una capa profunda compuesta normalmente de materiales más finos (arenas gruesas), formando una superficie resistente de pavimento asfaltado, depositado por encima del nivel del oleaje y de la marea (Owens et al., 2008). La capa de sedimento superficial más grueso posee un umbral elevado de puesta en movimiento. Se trata, por consiguiente de playas estables ya que presentan una baja respuesta a los cambios en los niveles de marea y en las condiciones de oleaje.

La persistencia del fuel supone una fuente crónica de contaminación de bajo

nivel, que puede representar toxicidad para distintos organismos entre ellos, nutrias marinas, patos o aves costeras (revisado por Peterson et al., 2003).

En playas arenosas, el enterramiento del fuel puede alcanzar varios metros de profundidad (Bernabeu et al., 2006), como respuesta a la morfodinámica de la playa. En este contexto, no existen estudios previos sobre la persistencia del fuel enterrado por lo que el conocimiento es limitado. Por ello, el objetivo principal de este trabajo ha sido evaluar la situación actual de las playas afectadas por la marea negra del *Prestige* (POS) siete años después del accidente, teniendo en cuenta los recientes avances realizados en el conocimiento de este tipo de contaminación. Además, se ha evaluado los efectos a corto plazo, condiciones hidrodinámicas y a largo plazo, variación del nivel del mar, sobre la preservación del fuel y/o la capacidad de autolimpieza de estas playas.

2 Antecedentes

En el accidente del *Prestige*, el 19 de noviembre de 2002, el petrolero se hundió a 240 Km de la costa y a una profundidad de 3600 m.

Se vertieron unas 67000 toneladas de fuel oil que contenía grandes cantidades de PAHs. Este fuel se caracterizó por la elevada densidad (0.99 g/cm) y una viscosidad (615 cSt a 50 °C y 30000 cSt a 15 °C). Su composición elemental era 85.8 % C, 11 % H, 2.28 % S y 0.69 N, siendo el 22 % hidrocarburos saturados, 50% hidrocarburos aromáticos y 28 % resinas y asfaltos. El contenido de metales fue 55 % Ni y 170 mg/Kg V. (Albaigés et al., 2003).

La POS afectó a más de 1200 Km de las costas de Portugal, España y Francia, siendo la costa gallega la más castigada, concretamente la zona de la Costa da Morte (NO, España).

En esta costa, las playas afectadas por la marea negra eran principalmente playas

arenosas. Los trabajos de seguimiento llevados a cabo en estas playas desde 2004 (Bernabeu et al., 2006; 2009) profundizaron en el conocimiento de la contaminación por fuel enterrado y su comportamiento a medio plazo. El comportamiento morfodinámico de la playa y su relación con las condiciones de oleaje se reveló como un factor decisivo tanto en las primeras etapas de la marea negra, como en su evolución posterior. Se identificaron distintas formas de aparición del fuel: galletas centimétricas (cm) y milimétricas (mm) y arenas grises, relacionadas con diferentes etapas de degradación del fuel y que dependían a su vez del comportamiento de la playa.

3 Material y métodos

3.1. Área de estudio

La costa Atlántica gallega está expuesta al oleaje procedente desde el NO hasta el SO. La dirección más frecuente (40-50 % del tiempo) es la del NO, con un amplio rango de alturas de ola, que pueden llegar a exceder los 6 m. El oleaje del O se presenta entre el 30 % y el 35 % del tiempo, con olas máximas que también pueden superar los 6 m. Finalmente, las olas del SO ocurren con menor frecuencia (<10%), y normalmente están asociadas con condiciones de tormenta con olas mayores de 5 m. Esta costa es mesomareal, con un rango en mareas vivas de aproximadamente 4.15 m (Davies, 1964).

En cuanto a fenómenos hidrodinámicos a largo plazo, la tasa de ascenso del nivel del mar calculada a partir de datos de los mareógrafos es de 2.91 mm/año para el puerto de Vigo, al sur, y 2.51 mm/año para el puerto de Coruña, al norte de la costa gallega, para el período 1943-2001 (Marcos et al., 2005). Esta elevación favorece la erosión de las playas porque los niveles altos de agua permiten a las

olas actuar en cotas más altas del perfil de la playa y trasladando de este modo el sedimento hacia el mar (Zhang et al., 2004).

La zona de estudio comprende las playas de Nemiña y O Rostro, las cuáles se localizan en la Costa da Morte (Galicia, NO España) (figura 1).

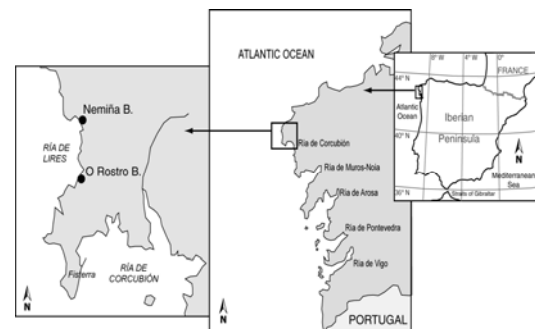


FIG 1: Área de estudio

La playa de Nemiña está confinada entre dos macizos acantilados, con una longitud de 1400 m. Su línea de costa presenta una alineación sensiblemente NO-SE, estando protegida de los oleajes más frecuentes del NO. Desde el punto de vista morfológico, la zona Norte de la playa presenta en su forma en planta la formación de un tómbolo, cuya playa seca se encuentra apoyada sobre el acantilado, prácticamente sin zona dunar. Hacia el Sur, la playa desarrolla una amplia zona dunar que termina en un puntal de arena, en las cercanías de la desembocadura de la ría. Esta zona, en cuanto a su forma en planta, presenta una línea de costa suavemente curvada, con la presencia de un cordón dunar en la parte alta del perfil.

La playa de O Rostro es también una playa confinada lateralmente en sus extremos, con unos 2000 m de longitud. Se encuentra orientada al SSO-NNE, con lo cual está muy expuesta a los oleajes dominantes y que son los más frecuentes en la zona. La playa presenta una amplia zona de dunas en la parte alta del perfil, estando únicamente interrumpida por la desembocadura de dos pequeños efluentes, uno al Norte y el otro al Sur.

3.2. Trabajo de campo

Con el propósito de estudiar la persistencia del fuel se llevaron a cabo dos campañas en las playas durante el año 2009, la primera entre el 9 y el 12 de marzo (condiciones de invierno) y la segunda el 18 y el 19 de octubre (condiciones de verano).

El objetivo principal de estas campañas fue la extracción de testigos de sedimento de 5 cm de diámetro en la zona intermareal de las playas mediante el empleo de un testigo de succión

optimizado (BOSC), junto con la adquisición de datos topográficos.

La estrategia de muestreo se basó en la presencia y apariencia del fuel identificadas en las campañas previas. Así, ambas playas se dividieron en tres zonas diferentes de trabajo. En cada una de ellas, se realizaron perfiles en los que se extrajeron 3 testigos siguiendo el perfil de playa, tomados en la zona del intermareal bajo, medio y alto. (figura 2).

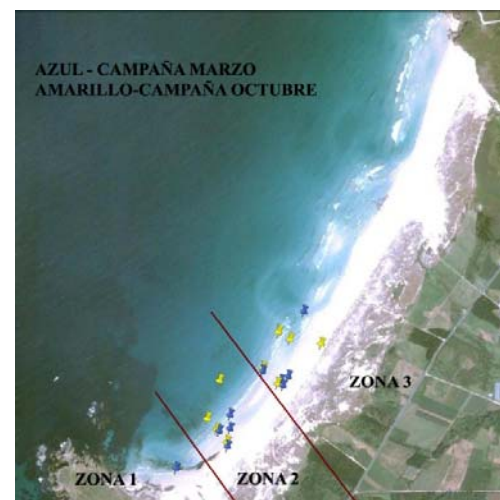
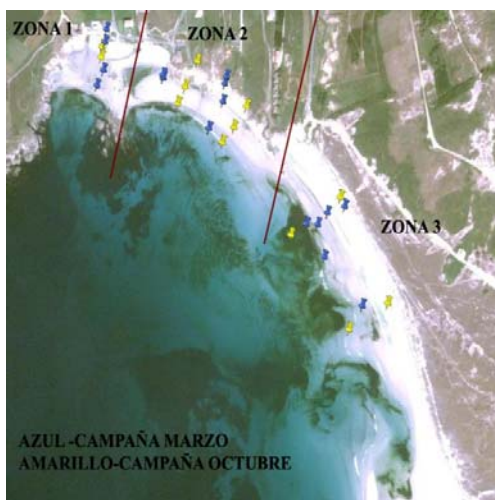


FIG 2: Imágenes de satélite de las dos playas estudiadas (cortesía de <http://earth.google.com>), mostrando la localización de los testigos extraídos: a) Nemiña y b) O Rostro.

3.2.1 Campaña de Marzo.

En la playa de Nemiña, en la zona 1 se realizó un perfil, en la zona 2, dos perfiles y en la zona 3, tres perfiles, obteniéndose un total de 17 testigos (figura 2.A). La longitud de los testigos osciló entre 55 y 280 cm.

En la playa de O Rostro se realizó un perfil en las zonas 1 y 2, y dos perfiles en la zona 3, obteniéndose un total de 11 testigos (figura 2.B), con longitudes que variaban entre 115.5 y 260.5 cm.

La campaña topográfica (figura 3) se llevó a cabo con una Estación Total Trimble 5600 (TS-5600), dicho instrumento mide desde un punto fijo ángulos con respecto a los planos horizontales y verticales, así como distancias alrededor de un punto. Para la determinación de las coordenadas reales de la estación origen se hicieron varias medidas de puntos de referencia con un GPS.

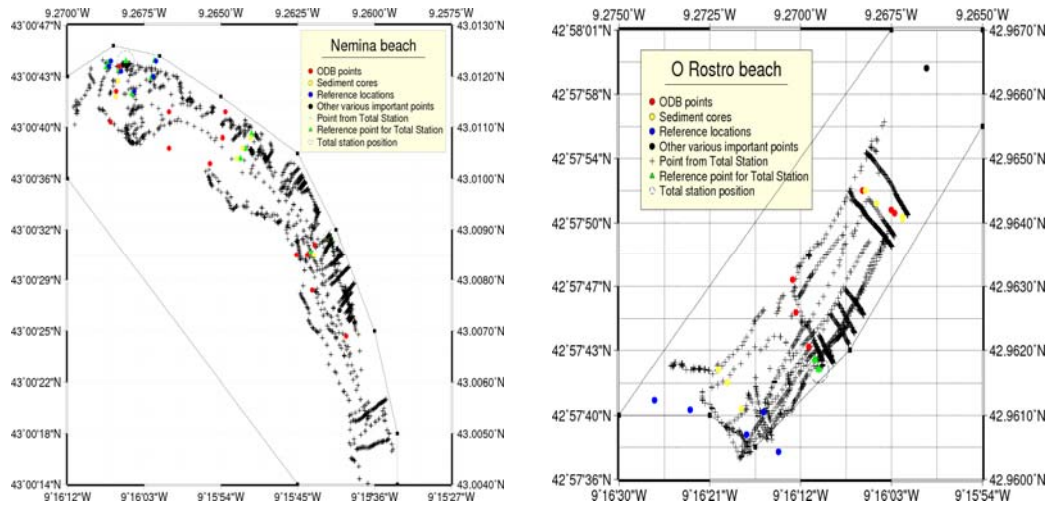


FIG 3: Conjunto de puntos medidos en las playas de: Nemiña (imagen izquierda) y O Rostro (imagen derecha) y límites del dominio considerado.

3.2.2 Campaña de Octubre.

En la playa de Nemiña se realizó en la zona 1 un perfil, en las zonas 2 y 3, dos perfiles, obteniéndose un total de 13 testigos. En la playa de O Rostro se realizaron un perfil en la zona 2 y dos en la zona 3, obteniéndose un total de 9 testigos. La longitud de los testigos osciló entre 28 y 234 cm en la playa de

Nemiña y entre 201 y 286 cm en la playa de O Rostro.

Para la adquisición de los datos topográficos (figura 4) se empleó un sistema Trimble DGPS, incluyendo un GPS móvil R8, una base T-5700 con una antena Zephyr y un controlador TSCE. El R8 se situó en un quad Kimco adaptado para la experimentación en playas.

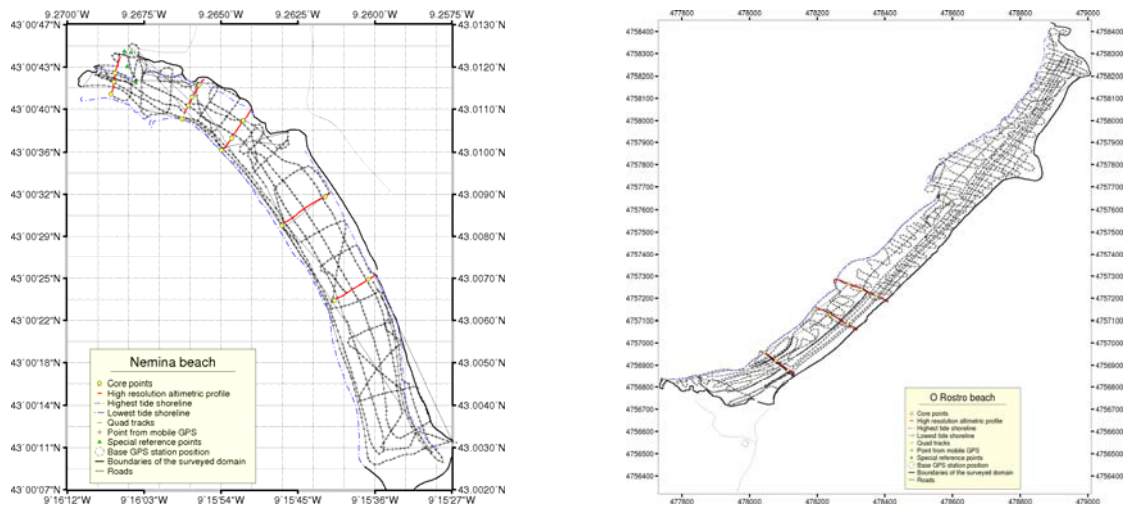


FIG 4: Puntos originales medidos durante la segunda campaña en las playas de Nemiña (imagen izquierda) y O Rostro (imagen derecha).

3.3. Trabajo de laboratorio

3.3.1. Procesado de muestras.

Los testigos se conservaron en una cámara frigorífica hasta su análisis.

Se procedió a la apertura longitudinal de todos los testigos para realizar una inspección *de visu*, fotografiar con una cámara (CANON EOS 400) y medir el color con un espectrofotómetro (Konica Minolta CM-2600 d) usando el software Spectra Magic Nx (versión 1.6).

Se empleó el espacio de color CIELAB desarrollado en 1976. El color se caracteriza mediante 3 parámetros: L^* , indica la luminosidad, su valor mínimo es 0 (negro) y el máximo 100 (blanco); a^* , indica si la muestra tiene tendencia hacia rojo (valores positivos), hacia verdes (valores negativos) o neutro (cero); b^* , indica si la muestra tiene tendencia hacia amarillo (valores positivos), hacia azules (valores negativos) o neutro (cero). Los valores de a^* y b^* no tienen un límite máximo ni mínimo determinado. Además se procesan los datos SCI (Incluye el Componente Especular) de modo que la evaluación del color mide el aspecto total independiente de las condiciones de rugosidad de la superficie.

Se conservó intacta una mitad de archivo de cada testigo en el congelador. La otra mitad se muestreó cada 10 cm en el caso de los testigos que presentaron fuel, arenas grises o se encontraban en zonas donde se habían observado galletas (cm) en superficie. Estas muestras se emplearon para realizar los análisis: granulométrico mediante tamizaje en seco, análisis elemental (carbono orgánico, inorgánico y total) y/o análisis de hidrocarburos.

En el análisis granulométrico se elimina la materia orgánica mediante el empleo de agua oxigenada, los cloruros mediante lavados con agua destilada y los posibles agregados mediante el hexametáfosfato sódico al 5 %. A continuación se separa

la fracción mayor de 63 μm mediante un tamizaje en húmedo. La fracción menor de 63 μm no suponía más del 1 %, tal y como es de esperar en playas por lo que se considera despreciable. La fracción mayor de 63 μm se deja secar en la estufa a 60 $^{\circ}\text{C}$ y a continuación se tamiza en la columna de tamices desde 8000 μm hasta 63 μm durante 15 minutos. Los datos obtenidos se procesan con el software Gradistat (versión 12).

En estudios previos, Bernabeu et al. (2006) encontraron fuel (galletas milimétricas (mm)) en el sobrenadante de las muestras sometidas a un tratamiento con agua oxigenada. En base a la cantidad encontrada establecieron una clasificación: traza, abundante y muy abundante. Con motivo de estos resultados se observa dicho sobrenadante a la lupa y se realizan fotografías con la cámara (Leica DFC 290) acoplada a la lupa empleando el software Leica Application Suite (versión 3.2).

El análisis elemental de una selección de muestras se llevó a cabo en el CACTI (Centro de Apoyo Científico y Tecnológico a la Investigación, Universidad de Vigo) donde emplean un analizador LECO. Se selecciona una muestra de la zona de arenas grises y otra de una zona "limpia" del testigo para tener un valor de referencia.

El análisis de hidrocarburos se lleva a cabo en la Universidad de Oporto, mediante el siguiente procedimiento. Se extrae 1 gramo de sedimento seco con hexano/acetona (1:1) en un equipo ASE. Los extractos son fraccionados en una columna de florisil. Los hidrocarburos alifáticos se determinan por cromatografía de gases con ionización a la llama en un detector (GL-FID) y los PAHs se analizan mediante cromatografía de gases mediante un detector selectivo de masa (GC-MS).

3.3.2. Procesado de datos.

Con el conjunto de datos topográficos obtenidos se realizó un modelo de elevación digital empleando un esquema de interpolación Akima con herramientas de GMT (versión 4.5.2) y scripts STOOCH.

Como consecuencia de la diferente metodología para la adquisición de datos, las topografías obtenidas en las dos campañas realizadas no son comparables en términos absolutos.

La información del oleaje ha sido proporcionada por el Banco de Datos Oceanográficos de la Dirección General de Puertos y Costas del Estado. Se trata de datos sintéticos de altura de ola (H), período (T), dirección (θ), secuenciales en el tiempo (un dato cada 3 horas) y obtenidos a partir de un modelo numérico WAM. Dicho modelo es un modelo de generación de oleaje a partir de regímenes de viento (serie WANA). En este trabajo se ha empleado el punto WANA 1042072 (43° N, 9.5° W, Costa da Morte) y los datos del mes previo a cada una de las campañas. Para la realización de los gráficos se ha empleado GMT (versión 4.5.2) y Matlab (versión 7.2).

El retroceso, efecto del ascenso del nivel del mar sobre la playa se calculó a partir de la conocida regla de Brunn (Brunn, 1962). Dicha regla asume un balance volumétrico entre la pérdida de sedimento en la playa y el sedimento depositado en la zona sumergida. Así, el retroceso de la línea de costa (R) viene definido como:

$$R = (x_c \cdot \Delta n) / (h^* + h_d) \quad (1)$$

donde Δn es el incremento del nivel del mar; x_c es la distancia a la línea de costa, h^* es la profundidad de cierre y h_d es la altura de la duna (que en este trabajo se

asume como cero, ya que sólo hemos considerado el retroceso de la zona intermareal).

La profundidad de cierre, h^* , se puede calcular a través de la expresión:

$$h^* = 1.75 H_{s12} - 57.9 (H_{s12}^2 / g T_s^2) \quad (2)$$

donde H_{s12} es la altura de ola significativa superada únicamente 12 horas al año (probabilidad=0.138) y T_s es el período asociado a H_{s12} .

Para el cálculo de x_c se utilizó el perfil de equilibrio de Dean, (Dean, 1977):

$$h^* = A x_c^{2/3} \quad (3)$$

siendo A un coeficiente de forma que puede calcularse como:

$$A = 0.51 w^{0.44} \quad (4)$$

w es la velocidad de sedimentación, la cual se puede obtener con la expresión:

$$w = 273 D_{50}^{1.1} \quad (5)$$

D_{50} es la mediana del tamaño de grano expresada en metros.

4 Resultados

4.1. Topografía

Para la campaña de marzo en la playa de Nemiña, la pendiente del perfil disminuye hacia el sur, variando aproximadamente entre un 5% en las zonas 1 y 2, hasta un valor de 1.5% en la zona central de la playa (figura 5.A). En O Rostro (figura 5.B), esta diferencia no es tan marcada con valores aproximados de 2.25% en el sur y aumentando hasta 2.6% en la zona central.

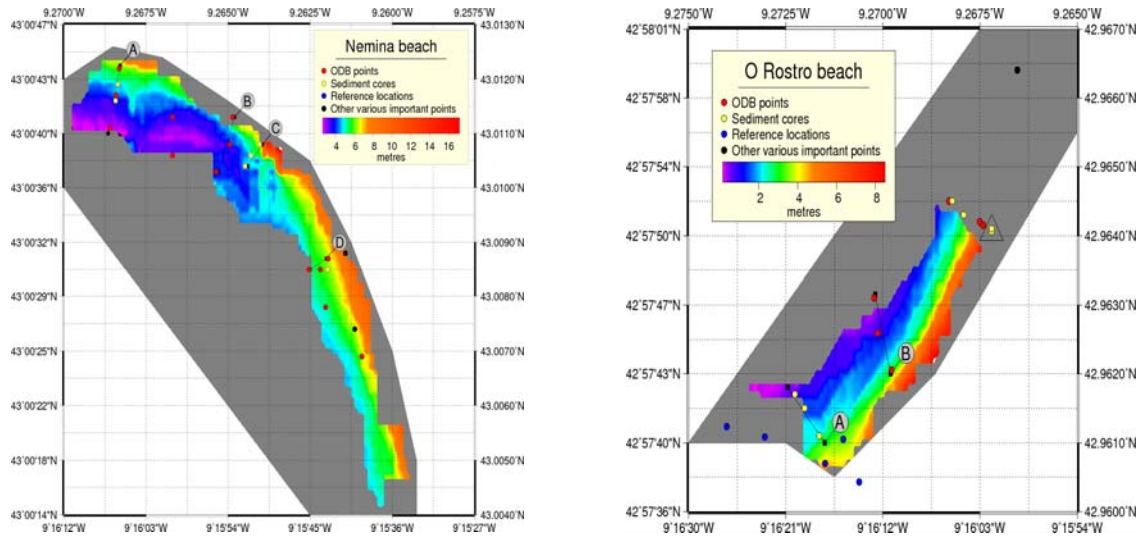


FIG 5: Mapas interpolados del conjunto de puntos medidos durante la primera campaña en las playas de: a) Nemiña y b) O Rostro. En gris, el dominio considerado durante el muestreo.

En la campaña de octubre en la playa de Nemiña (figura 6.A), la variación de pendiente se suaviza con valores aproximados de 3.2 % al Norte y 2.9 %

en la zona central. En O Rostro (figura 6.B) la pendiente es bastante similar a lo largo de la playa, variando entre 3.3 % y 3.4 % aproximadamente.

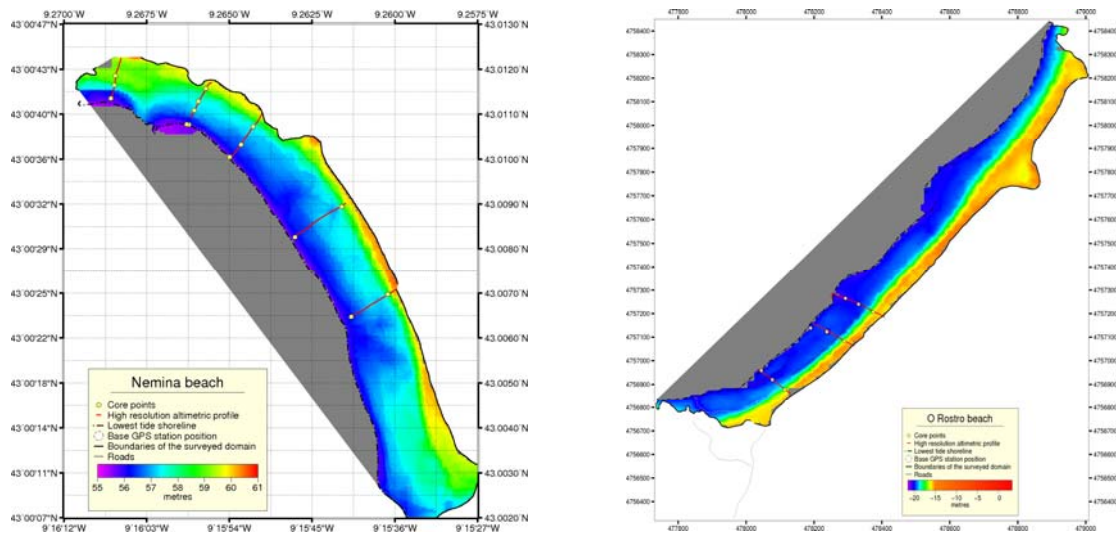


FIG 6: Mapas de elevación de las playas durante la segunda campaña: a) Nemiña y b) O Rostro.

4.2. Identificación de fuel

La Tabla 1 recoge la información principal de cada uno de los testigos estudiados. Los testigos correspondientes a la campaña de marzo presentaban arenas grises y galletas (cm) en ambas playas. En Nemiña, se encontraron arenas grises a una profundidad mínima de 31.5 cm y

a una profundidad máxima de 136 cm. El espesor de las capas de arenas grises osciló entre 1 y 10 cm. Las galletas (cm) fueron escasas. En O Rostro se identificaron arenas grises a una profundidad mínima de 159.5 cm y a una máxima de 260.5 cm. El espesor de estas capas fue de 7.5-8.5 cm. Se identificaron más galletas (cm)

que en Nemiña y a una profundidad mínima de 19 cm y máxima de 194 cm.

En la campaña de octubre se identificaron arenas grises sólo en la playa de Nemiña y una única galleta (cm) en la playa de O Rostro.

En Nemiña se encontraron arenas grises a una profundidad mínima de 1 cm y a una profundidad máxima de 220 cm. El espesor de las capas de arenas grises fue muy variable, entre 1 y 114

cm (figura 7.A), dependiendo del testigo considerado. En O Rostro, aparece una galleta (cm) a 153 cm de profundidad (figura. 7.B).

En el estudio del sobrenadante se identificaron galletas milimétricas (mm),

entre 1-5 en 60 g de muestra aproximadamente, con tamaños comprendidos entre 200 y 3000 μm , pudiendo considerarse como traza según el criterio de Bernabeu et al., (2006).

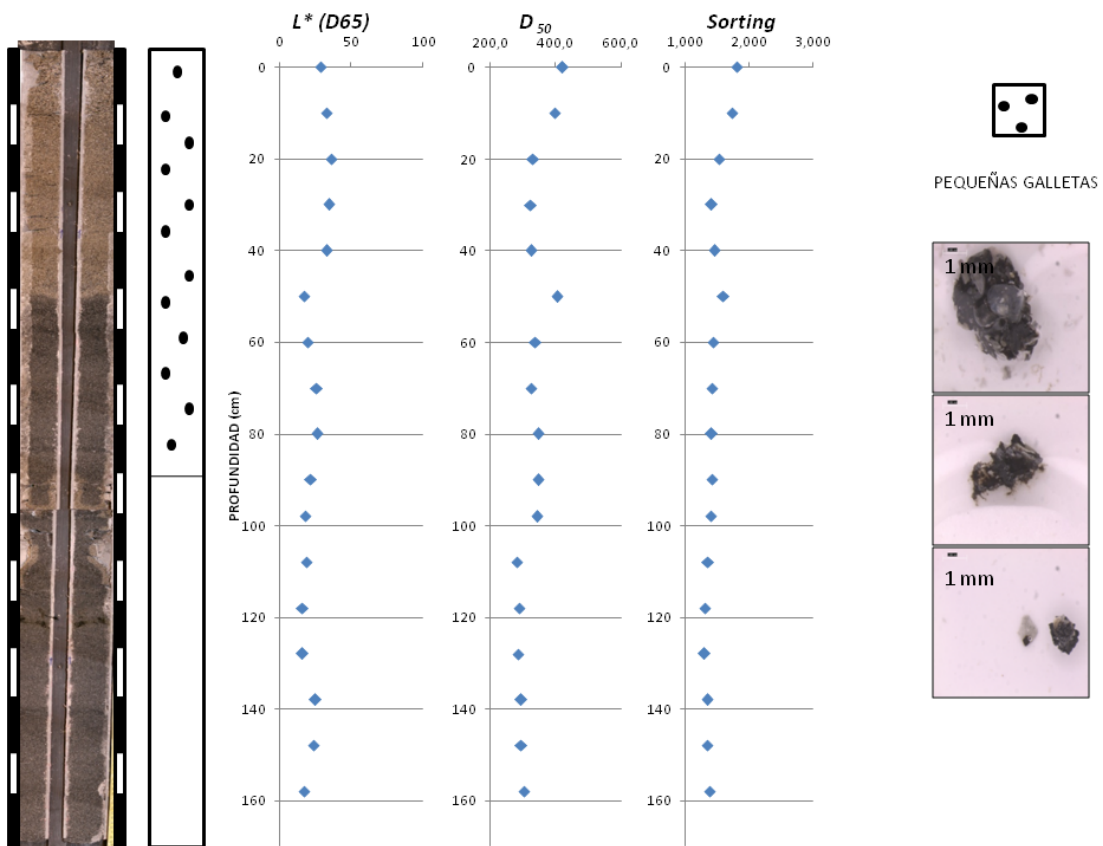
En marzo las muestras que presentaron galletas (mm) fueron escasas en ambas playas. Sin embargo, en octubre se produjo un incremento de las galletas (mm) tanto en Nemiña como en O Rostro. En Nemiña se encontraron en zonas dónde se habían identificado arenas grises (figura 7.A). En O Rostro estuvieron presentes en casi todos los testigos que *de visu* parecían limpios (figura 7.B), siendo menos abundantes en los de la zona intermareal alta.

Playas	Sector playa	Posición en perfil	Coordenadas	Longitud testigo (cm)	Localización del fuel en profundidad (cm)	Morfología del fuel
Marzo 2009						
NEMIÑA	1	IB	43 ⁰ 0.666 N 9 ⁰ 16.115 W	106	103-106	Arenas grises
		IM	43 ⁰ 0.684 N 9 ⁰ 16.104 W	55	31.5-40.5;44-48;52-55	Arenas grises
		IM	43 ⁰ 0.716 N 9 ⁰ 16.101 W	56.5	48-56.5	Arenas grises
		IA	43 ⁰ 0.730 N 9 ⁰ 16.098 W	102	75;82-83;85.5-92; 99-102	Arenas grises
	2	IM-1	43 ⁰ 0.675 N 9 ⁰ 16.001 W	103	No se detectó fuel	
		IM-1	43 ⁰ 0.679 N 9 ⁰ 16.001 W	140	126-136	Arenas grises
		IB-2	43 ⁰ 0.618 N 9 ⁰ 15.921 W	85	85	Arenas grises
		IB-2	43 ⁰ 0.619 N 9 ⁰ 15.922 W	182	No se detectó fuel	
		IM-2	43 ⁰ 0.648 N 9 ⁰ 15.897 W	166	No se detectó fuel	
		IM-2	43 ⁰ 0.668 N 9 ⁰ 15.893 W	148	No se detectó fuel	
		IA-2	43 ⁰ 0.676 N 9 ⁰ 15.891 W	112	No se detectó fuel	
	3	IB-1	43 ⁰ 0.508 N 9 ⁰ 15.752 W	203	No se detectó fuel	
		IM-1	43 ⁰ 0.521 N 9 ⁰ 15.715 W	187	No se detectó fuel	
		IM-1	43 ⁰ 0.508 N 9 ⁰ 15.732 W	217	100-120	Galletas mm *
		IA-1	43 ⁰ 0.528 N 9 ⁰ 15.686 W	280	No se detectó fuel	
		IM-2	43 ⁰ 0.470 N 9 ⁰ 15.721 W	219	24-25	Galleta cm
		IB-3	43 ⁰ 0.414 N 9 ⁰ 15.655 W	199	No se detectó fuel	

O ROSTRO	1	IM	42° 57.684 N 9° 16.316 W	220	139-141.5;192-194 90-100;139-147;197	Galletas cm Galletas mm*	
	2	IB	42° 57.759 N 9° 16.180 W	218	40.5-41.5	Galleta cm	
		IB	42° 57.786 N 9° 16.180 W	223.5	No se detectó fuel		
		IM	42° 57.755 N 9° 16.207 W	260.5	252-260.5 10-20;143-153	Arenas grises Galletas mm *	
		IM	42° 57.755 N 9° 16.207 W	183.5	159.5-166 10-20;143-153	Arenas grises Galletas mm*	
		IA	42° 57.722 N 9° 16.186 W	119	No se detectó fuel		
		3	IB-1	42° 57.869 N 9° 16.097 W	208.5	No se detectó fuel	
	IM-1		42° 57.860 N 9° 16.032 W	213	No se detectó fuel		
	IM-1		42° 57.852 N 9° 16.050 W	115.5	No se detectó fuel		
	IA-1		42° 57.842 N 9° 16.045 W	167	No se detectó fuel		
	IB-2		42° 57.698 N 9° 16.992 W	204.5	19;21;88-89	Galletas cm	
	Octubre 2009						
NEMIÑA	1	IB	43° 0.630 N 9° 16.105 W	28	12;19.5-21.5 0-28	Arenas grises Galletas mm*	
		IM	43° 0.699 N 9° 16.107 W	222	188-189 0-30;40-50;90- 110;134- 164;184- 222	Arenas grises Galletas mm*	
		IA	43° 0.711 N 9° 16.106 W	166	52-166 0-90	Arenas grises Galletas mm*	
	2	IB-1	43° 0.646 N 9° 15.975 W	142	No se detectó fuel		
		IM-1	43° 0.665 N 9° 15.962 W	224	209.5-224	Galletas mm*	
		IA-1	43° 0.694 N 9° 15.941 W	183	0-10;20-30;90- 115;134	Galletas mm*	
		IB-2	43° 0.602 N 9° 15.898 W	131	10-90;100-131	Galletas mm *	
		IM-2	43° 0.619 N 9° 15.878 W	234	171-220 0-10;20-30;40-100; 120-145;165-195; 225-234	Arenas grises Galletas mm*	
		IA-2	43° 0.643 N 9° 15.856 W	184	0-10;40-110	Galletas mm*	
	3	IB-1	43° 0.496 N 9° 15.779 W	121	No se detectó fuel		
		IM-1	43° 0.539 N 9° 15.693 W	201.5	0-13 0-60;90-100;110- 130;177-201.5	Arenas grises Galletas mm *	
		IB-2	43° 0.388 N 9° 15.678 W	104	No se detectó fuel		
		IM-2	43° 0.418 N 9° 15.611 W	231	No se detectó fuel		
	O ROSTRO	2	IB	42° 57.779 N 9° 16.238 W	273	0-30;60-80;100- 130;136-156;196- 206;256-273	Galletas mm*
			IM	42° 57.758 N 9° 16.214 W	214	0-70;80-214	Galletas mm*

3	IA	42° 57.734 N 9° 16.188 W	235	0-10;30-50;110-120	Galletas mm*
	IB-1	42° 57.752 N 9° 16.207 W	243	0-165;175-243	Galletas mm*
	IM-1	42° 57.876 N 9° 16.096 W	286	10-30;50-100;110-130;143-163;173-183;193-233;263-286	Galletas mm*
	IA-1	42° 57.846 N 9° 16.059 W	230	10-20;90-100	Galletas mm*
	IB-2	42° 57.945 N 9° 16.056 W	286	153 0-249;279-286	Galleta cm Galletas mm*
	IM-2	42° 57.931 N 9° 16.027 W	241	No se detectó fuel	
	IA-2	42° 57.920 N 9° 16.037 W	201	No se detectó fuel	

Tabla 1: Descripción detallada de los testigos muestreados, indicando la posición, el sector y perfil de la playa (IB, IM, IA siendo intermareal bajo, medio y alto, respectivamente), profundidad de arena, localización del fuel y morfología presentada (* observado después del procesado de la muestra en el laboratorio).



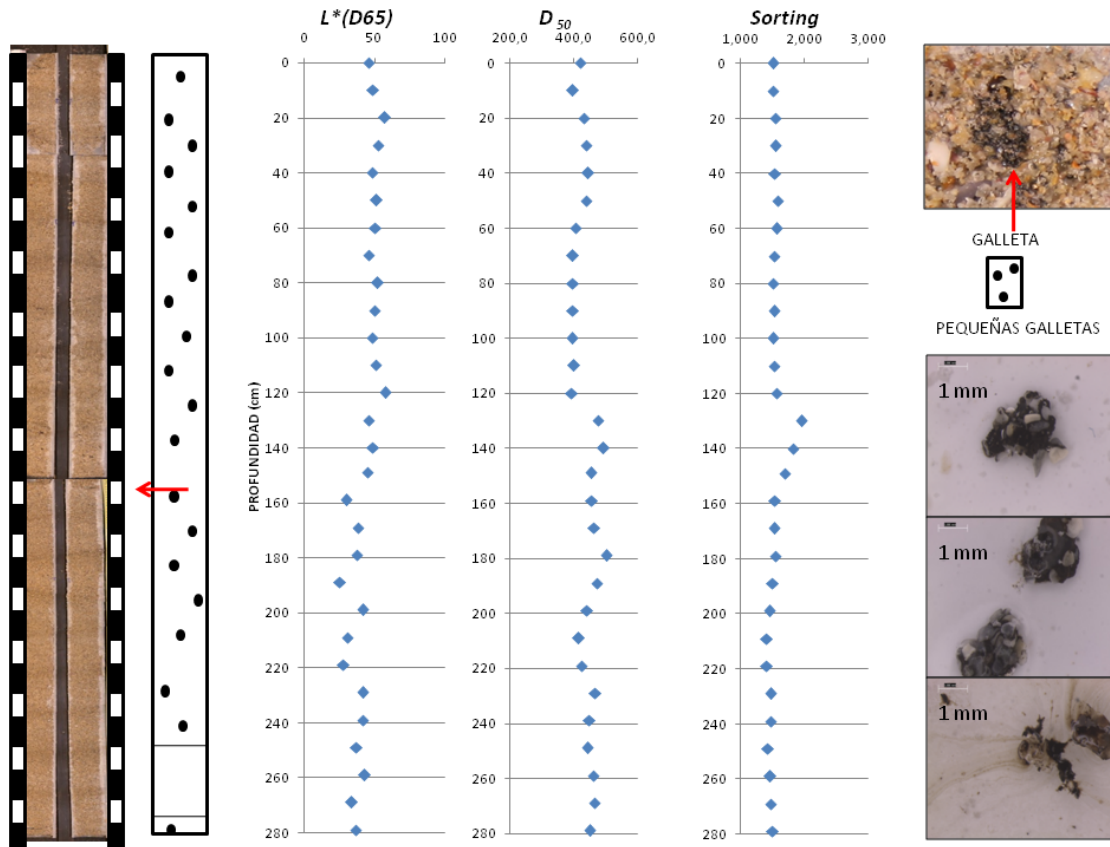


FIG 7: Fotografías, gráficos de variación de los parámetros (L^* , D_{50} y *sorting*) en profundidad de testigos de Nemiña (a) imagen superior) y O Rostro (b) imagen inferior)

Observando los resultados del espectrofotómetro (Tabla 2) en marzo, la playa de Nemiña presentaba unos valores máximos y mínimos de los parámetros (L^* y a^*) mayores que en octubre. Sin embargo, el parámetro b^* tiene el mayor valor máximo en octubre. En O Rostro, los resultados presentan una tendencia inversa, con valores menores de los parámetros (L^* , a^* y b^*), en marzo que en octubre.

Estos resultados son el reflejo de la diferente aparición del fuel en cada playa y campaña.

En Nemiña había menos arenas grises en la campaña de marzo, de ahí, que los valores de la luminosidad fuesen más elevados.

Sin embargo, en O Rostro, en la campaña de marzo aparecieron arenas grises y más galletas que en octubre.

Por otra parte, los valores medios de L^* y b^* en la campaña de marzo son similares en ambas playas. En octubre difieren más debido a la abundancia de arenas grises en Nemiña.

En pruebas realizadas en una serie de muestras seleccionadas que fueron limpiadas previamente, los resultados ponen de manifiesto la influencia del fuel en el parámetro del color L^* , ya que en estas muestras el valor alcanzado por éste es superior.

CAMPAÑA PLAYA		L*			a*			b*		
		Máx.	Mín	Media	Máx	Mín	Media	Máx	Mín	Media
1	Nemiña	89.21	18.82	43.69± 10.77	9.42	0.59	2.57± 0.80	14.26	-1.75	8.91± 3.90
	O Rostro	58.02	18.84	42.2± 8.39	4.535	1.66	3.32± 0.54	13.81	-2.50	8.66± 3.83
2	Nemiña	74.54	7.00	34.87± 9.05	7.80	-1.20	2.25± 1.35	26.21	-6.28	12.51± 6.32
	O Rostro	81.26	25.91	45.20± 11.36	8.42	1.31	4.01± 0.99	36.25	9.13	19.01± 4.19

Tabla 2: Valores máximos, mínimos y media (\pm desviación estándar) de los parámetros espectrofotométricos para cada campaña (1 marzo, 2 octubre) y cada playa.

4.3. Parámetros sedimentológicos

El valor medio del D_{50} en la campaña de marzo obtenido de las muestras de Nemiña fue de $364.8 \pm 55.7 \mu\text{m}$ y en O Rostro de $414.0 \pm 48.2 \mu\text{m}$. La selección (*sorting*) de las muestras es menor en O Rostro (1.271 - $1.807 \mu\text{m}$) y se mantiene casi constante en profundidad, se trata de muestras bien seleccionadas o moderadamente seleccionadas. Mientras que en Nemiña, oscila entre 1.244 y $2.896 \mu\text{m}$, son muestras moderadamente bien seleccionadas o moderadamente seleccionadas.

En la campaña de octubre el valor medio del D_{50} obtenido de las muestras de Nemiña fue de $352.5 \pm 45.8 \mu\text{m}$ y en O Rostro fue de $431.2 \pm 45.2 \mu\text{m}$. La selección (*sorting*) de las muestras nuevamente, es menor en O Rostro y se mantiene casi constante en profundidad (1.317 - $1.949 \mu\text{m}$) mientras que en Nemiña es más variable (1.297 - $2.343 \mu\text{m}$).

En Nemiña el tamaño de grano decrece a medida que nos desplazamos hacia el intermareal alto. Sin embargo, en O Rostro esta tendencia sólo se aprecia en un perfil de la zona 3 tanto en marzo como en octubre.

En Nemiña el tamaño de grano se incrementa ligeramente a medida que nos desplazamos hacia el sur de la playa (desde la zona 1 a la 3). En O Rostro no hay una dirección de incremento de tamaño de grano predominante.

Los resultados de materia orgánica de las muestras con arenas grises de Nemiña varían entre 0.32 - 0.67% de C org para las muestras de marzo (de las zonas 1 y 2) y entre 0.35 y 0.72% de C org. para las de octubre ubicadas en la zona 1, la cual está próxima a un emisario de aguas fecales. Los valores de las muestras de referencia oscilaron entre 0.61 - 1.21% C org en marzo y entre 0.46 - 0.5% en octubre.

Los resultados de los análisis de hidrocarburos de las muestras seleccionadas indican una baja concentración de PAHs. De hecho, en algunas muestras algunos de los PAHs analizados se encuentran por debajo del límite de detección.

4.4. Clima marítimo

Los resultados de las condiciones de oleaje se muestran en la figura 8 (A,B). Se observa que en febrero y marzo predomina el oleaje que viene del NO, el cual lleva asociado las mayores alturas de ola. La dirección menos frecuente es la del SO y la que menores alturas de ola presenta es la del NE (figura 8.C). La altura de ola significativa oscila entre 3.7 y 11.8 m en marzo.

En septiembre y octubre, la altura de ola oscila entre 0.4 y 2.9 m , hay una mayor variación de la dirección, la más frecuente es la del NE, la cual no afecta a las playas, seguida de la NO, además existe un período 15 días antes de la

campaña con oleaje del SO, el cual presenta las mayores alturas de ola.

Las diferencias de altura de ola son un claro reflejo de las condiciones de invierno y de verano respectivamente.

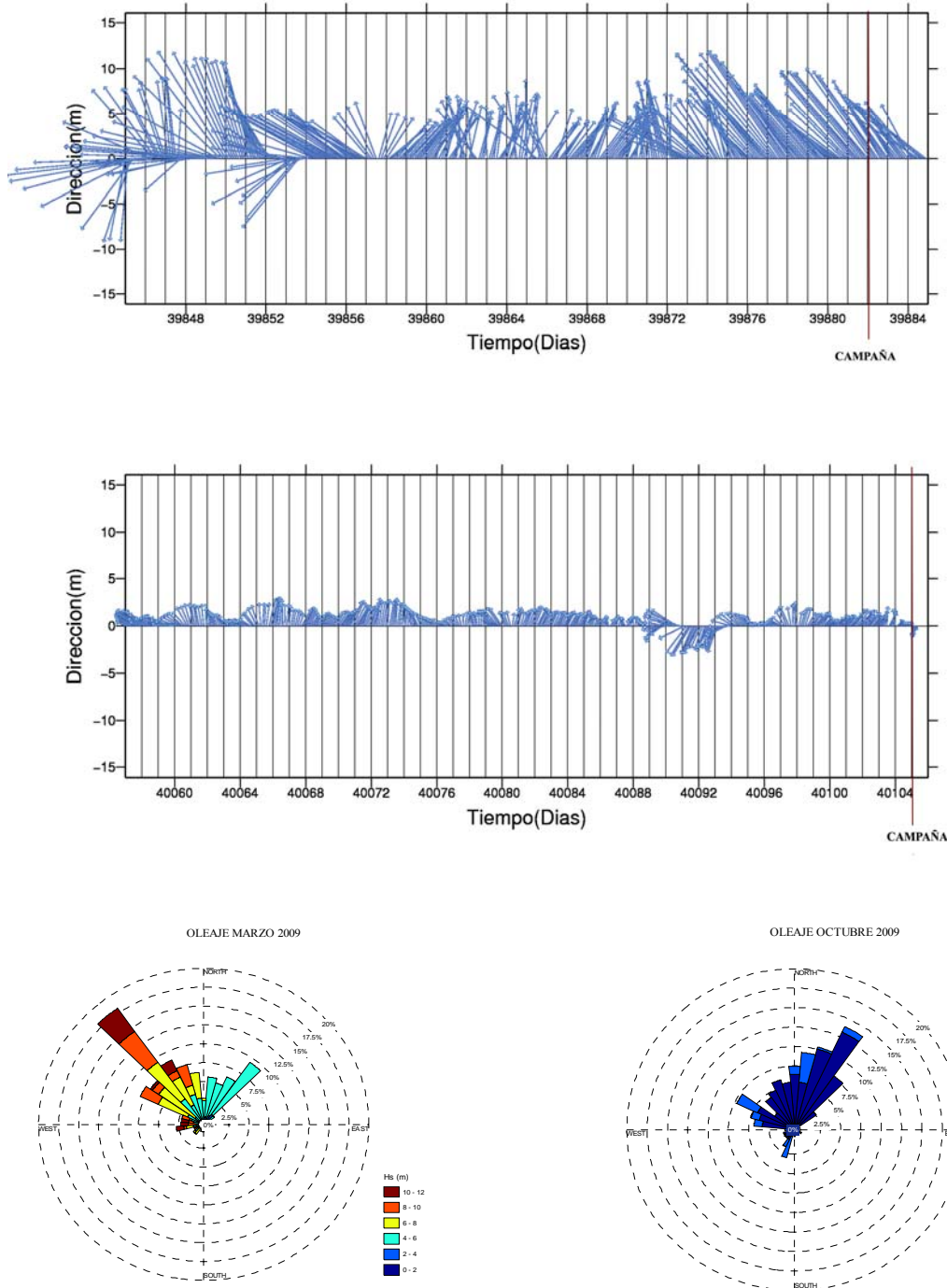


FIG 8: a) Evolución de la dirección de procedencia del oleaje (marzo, la línea roja indica el primer día de campaña). b) Evolución de la dirección de procedencia del oleaje (octubre, la línea roja indica el primer día de campaña). c) Rosa de oleaje marzo (izquierda) y octubre (derecha).

4.5. Retroceso de la línea de costa

Asumiendo un valor medio de ascenso del nivel del mar para el área de estudio, $\Delta n = 0.00271$ m y sabiendo que el valor de h^* para estas playas es de 11.93 m, la tasa de retroceso de la línea de costa (Tabla 3), calculada según la regla de Brunn, es aproximadamente de 0.20 m/año. Esto permite estimar un retroceso

total en los últimos 7 años (desde la POS) de 1.3-1.4 m. Dicho retroceso implica un movimiento de sedimento hacia el submareal $23522 - 29828$ m³ teniendo en cuenta las diferencias de tamaño de grano y longitud de cada playa.

PLAYA	D_{50} (m) ^{&}	w	A	x_c	R (m/año)	Volumen arena ^{&&} (m ³ en 7 años)
Nemiña	0.00035865	0.04428948	0.12940243	0.04654935	0.20112411	23522.4206
O Rostro	0.0004226	0.05304996	0.14009790	0.05243816	0.17852973	29828.428

Tabla 3: Valores obtenidos para los diferentes parámetros necesarios para el cálculo R ([&] se ha tomado un valor medio del D_{50} obtenido para marzo-octubre, ^{&&} el volumen se ha calculado como el producto de $R \cdot h^* \cdot \text{longitud de la playa}$)

5 Discusión

Siete años después del accidente del Prestige siguen existiendo restos de fuel en las playas de la costa da Morte (Galicia, NO España).

El fuel enterrado se ha encontrado a profundidades de hasta 286 cm, siendo ésta la máxima profundidad de extracción de testigos alcanzada con el BOSC. La apariencia del fuel es la misma que en campañas previas: galletas (cm), galletas (mm) y arenas grises, aunque la abundancia de estos restos es claramente menor que en los primeros estudios posteriores al accidente.

Experimentos recientes han revelado que el inicio de la degradación de las galletas enterradas es relativamente rápida, del orden de días a semanas (Bernabeu et al., 2010). Por ello, la presencia de galletas (cm) enterradas, aunque escasa, es indicativa de un aporte reciente de fuel a la playa. La zona submareal próxima actuaría como zona de acumulación o reservorio de fuel, procedente de la plataforma continental, que sólo emerge en la playa bajo condiciones hidrodinámicas determinadas. La existencia de estas

zonas de acumulación en el submareal próximo a la costa justificaría los resultados obtenidos en trabajos de detección del fuel en la plataforma gallega (Serrano et al., 2006), donde se estableció un rápido descenso de los restos de fuel entre enero de 2003 y octubre de 2004, disminuyendo desde 300 kg/km² hasta 0.5 kg/km², sin identificar la ubicación final de este fuel.

En cuanto a las arenas grises, los análisis realizados en muestras seleccionadas han determinado niveles bajos de materia orgánica típicos de playas arenosas, confirmando que la presencia de arenas grises está asociada al enterramiento y degradación de las galletas de fuel.

En cuanto a las galletas (mm), no son visibles a simple vista. Suponen un volumen de fuel muy bajo, por lo que no son detectables con los métodos de análisis de PAHs estándar. Sin embargo, estas galletas (mm) aparecen siguiendo dos tendencias: a) asociadas a las galletas (cm) enterradas o a niveles de arenas grises; b) independientes distribuidas de manera homogénea a lo largo de toda la zona de estudio.

En el primer caso, la presencia de estas galletas (mm) es un indicador de la degradación del fuel *in situ*, en una zona en la que no hay un movimiento significativo de sedimento, por lo que define procesos relativamente recientes (semanas-meses). En el segundo caso, la presencia de estos restos de fuel se relaciona con eventos de contaminación antiguos (años), donde tras la degradación del fuel enterrado, el transporte de sedimento estacional ha distribuido las galletas (mm) uniformemente en el sedimento. Dichas galletas han alcanzado un tamaño crítico, similar al del sedimento, a partir del cual su degradación por abrasión durante el transporte disminuye, favoreciendo su preservación.

La baja concentración de fuel enterrado dificulta su estimación a partir de los métodos de análisis estándar. Así, las medidas realizadas con el espectrofotómetro se presentan como una herramienta útil en la identificación del fuel, incluso en sedimento que se presenta limpio "*de visu*". Así, la luminosidad (L^*) disminuye de forma evidente en la zona de las arenas grises, debido al oscurecimiento de los granos de arena por el fuel. Por otra parte, las galletas (mm), aunque se presentan en muy bajas concentraciones y su presencia se identifica únicamente a partir del procesado de la muestra, la luminosidad toma valores menores que para playas que no se han visto afectadas por vertidos de hidrocarburos. Esto revela que las playas afectadas por mareas negras preservan a lo largo del tiempo un revestimiento de los granos uniforme y de baja intensidad en todo el depósito sedimentario, no identificable a simple vista pero sí mediante medios ópticos.

5.1. Influencia de la morfodinámica y condiciones del oleaje

En el período posterior a la catástrofe se encontró que el comportamiento morfodinámico y las condiciones de oleaje estaban relacionados con la distribución del fuel y las diferentes morfologías encontradas (Bernabeu et al., 2006,2009). Siete años después, estos mismos factores siguen condicionando la persistencia del fuel en estas playas.

Nemiña es una playa protegida de los oleajes frecuentes de las costas gallegas, por tanto, la movilización de sedimento es menos frecuente (esta es la causa de que la selección del sedimento sea ligeramente peor) y las galletas que llegan a ella pueden degradarse gracias a la acción de los microorganismos degradadores de hidrocarburos y dar lugar a arenas grises. Debido a esto, los niveles de arenas grises se pueden encontrar cerca de la superficie.

O Rostro es una playa expuesta donde casi no hay arenas grises, cuando aparecen es en profundidad, porque hay una movilización continua de sedimento que no permite que la galleta se degrade en la zona en la que se ha depositado, sino que se va fragmentando hasta originar las galletas milimétricas que viajan ligadas al sedimento.

5.2. Influencia del cambio climático

Uno de los efectos principales del cambio climático a medio-largo plazo es el ascenso del nivel del mar. En costas arenosas este ascenso está asociado a la erosión de las playas.

Las estimaciones calculadas en este trabajo establecen una erosión del orden de 3800 m³ de arena/año para las playas de estudio. Esto supone el traslado del material de las capas superficiales de la playa, el más afectado por la POS, a zonas profundas, donde no estará afectado por las variaciones estacionales de la playa, perdiéndose así la capa más contaminada de sedimento.

Por tanto, este ascenso del nivel del mar asociado al cambio climático actúa en la zona de estudio como una herramienta de limpieza natural de las playas afectadas. De este modo, las playas estudiadas se encontrarán más limpias de lo que cabría esperar, si no hubiese variación del nivel del mar. Así, aunque el ascenso del nivel del mar tiene un impacto negativo en las playas debido a la erosión, en este caso, supondría un impacto positivo en la eliminación del fuel.

Ésta es nueva aplicación de la regla de Bruun ya que se relaciona el retroceso con el volumen de arena movilizado y su implicación en el estudio del fuel. Normalmente este método se emplea para calcular tasas de retroceso de la línea de costa debido a la erosión en playas. Aparece de este modo una nueva utilidad de este método en las mareas negras, permitiendo la estimación del tiempo necesario para mover el sedimento contaminado y encontrar la playa limpia. Siempre teniendo en cuenta que es importante conocer los datos de ascenso del nivel del mar (esto sólo es posible con una buena red de mareógrafos) y las tendencias futuras para la zona afectada.

6 Conclusiones

En este trabajo, se ha comprobado la persistencia del fuel 7 años después del vertido del *Prestige*. La persistencia del fuel en este caso está relacionada con dos tipos de procesos: recientes, relacionados con una fuente próxima de fuel del *Prestige*; y a medio plazo, donde el fuel se ha degradado hasta un tamaño crítico a partir del cual disminuye o se ralentiza su capacidad de degradación mecánica y físico-química, persistiendo en forma de galletas (mm) de fuel.

Los datos de luminosidad se presentan como una herramienta útil para identificar la presencia de fuel cuando los métodos de análisis estándar y la

identificación a simple vista fallan. Uno de los objetivos a desarrollar en el futuro será el desarrollo de una técnica de detección (cualitativa) de fuel mediante el uso de dicho instrumento.

Los cambios observados en cada playa y su relación con las distintas condiciones oceanográficas nos indican la necesidad de diseñar un modelo para poder predecir el comportamiento del fuel enterrado en el que se deberá tener en cuenta las escalas temporales de ascenso del nivel del mar y persistencia del fuel. Esta línea de investigación dará lugar a futuros trabajos que servirán para la elaboración de un protocolo de evaluación y actuación del fuel enterrado en playas arenosas.

Agradecimientos

Estos trabajos han sido financiados por el MICINN en el marco del proyecto AMPERA de la UE (Contract No. ERAC-CT2005-016165). Además queremos expresar nuestro agradecimiento al profesor Frédéric Bouchette de la Universidad de Montpellier y a la investigadora Marisa Almeida de la Universidad de Oporto, por la información aportada a este trabajo.

Referencias

- Albaigés, J., J. M. Bayona, y S. Diez, 2003: Informe sobre la Red de vigilancia de manchas de fuel asociadas al vertido del *Prestige*. CSIC, 33.
- Bernabeu, A. M., M. Nuez de la Fuente, D. Rey, B. Rubio, F. Vilas, R. Medina, y M. González, 2006: Beach morphodynamics for-cements in oiled shorelines: coupled physical and chemical processes during and after fuel burial. *Marine Pollution Bulletin* 52/10, 1156–1168.

- Bernabeu, A. M., D. Rey, A. Lago, y F. Vilas, 2010: Simulating the influence of physicochemical parameters on subsurface oil on beaches: Preliminary results. *Marine Pollution Bulletin*, doi:10.1016/j.marpolbul.2010.04.001.
- Bernabeu, A. M., D. Rey, B. Rubio, F. Vilas, C. Dominguez, J. M. Bayona, y J. Albaigés, 2009: Assessment of cleanup needs of oiled sandy beaches: Lessons from the prestige oil spill. *Environmental Science & Technology* 43 (7), 2470-2475.
- Bruun, P., 1962: Sea level rise as cause of shore erosion. *Am. Soc. Civ. Eng. Proc., J. Waterways Harbors Div.* 88, 117-130.
- Davies, J. L., 1964: A morphogenic approach to world shorelines. *Z. Geomorphol.* 8 (Mortensen Sonderheft), 127-142.
- Dean, R. G., 1977: Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. *Ocean Engineering Report*, 12, University of Delaware, 45p
- Gundlach, E. R., P. D. Boehm, M. Marchand, R. M. Atlas, D. M. Ward, y D. A. Wolfe, 1983: The fate of Amoco Cadiz oil. *Science* 221 (4606), 122-129.
- Marcos, M., D. Gomis, S. Monserrat, E. Álvarez-Fanjul, B. Pérez, y J. García-Lafuente, 2005: Consistency of long sea-level time series in the northern coast of Spain. *Journal of Geophysical Research C: Oceans* 110 (3), 1-13.
- Owens, E. H., E. Taylor, y B. Humphrey, 2008: The persistence and character of stranded oil on coarse-sediment beaches. *Marine Pollution Bulletin* 56, 14-26.
- Page, D. S., J. C. Foster, P. M. Fickett, y E. S. Gilfillan, 1988: Identification of petroleum sources in an area impacted by the Amoco Cadiz oil spill. *Marine Pollution Bulletin* 19 (3), 107-115.
- Peterson, C.H., S. D. Rice, J. W. Short, D. Esler, J. L. Bodkin, B. L. Ballachey, y D. B. Irons, 2003: Long-term ecosystem response to the Exxon Valdez oil spill. *Science* 302, 2082-2086.
- Serrano A., F. Sánchez, I. Preciado, S. Parra, y I. Frutos, 2006: Spatial and temporal changes in benthic communities of the Galician continental shelf after Prestige oil spill. *Marine Pollution Bulletin* 53, 315-331.
- Vandermeulen, J. H., D. E. Buckley, E. M. Levy, B. F. N. Long, P. McLaren, y P.G. Wells, 1979: Sediment penetration of Amoco Cadiz oil, potential for future release and toxicity. *Marine Pollution Bulletin* 10, 222-227.
- Wang, Z., M. Fingas, E. H. Owens, L. Sigouin, y C. E. Brown, 2001: Long-term fate and persistence of the spilled Metula oil in a marine salt marsh environment: Degradation of petroleum biomarkers. *J. Chromatogr.* 926, 275-290.
- Zhang, K., B. C. Douglas, and S. P. Leatherman, 2004: Global warming and coastal erosion. *Climate change* 64, 41-58.