INCENTIVOS A PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN DE EXCELENCIA Convocatoria 2012

MEMORIA DE SEGUIMIENTO ANUALIDAD 2012 DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Investigador/a principal: Jesús García Lafuente

Código del proyecto: P12-RNM1540

Denominación del proyecto: MOCBASE. MODELIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA CIRCULATORIO DE LA BAHÍA DE ALGECIRAS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE DIRECTRICES DE ACTUACIÓN ANTE SITUACIONES DE EMERGENCIA.

Organismo/Universidad: Universidad de Málaga

Centro: ETSI Telecomunicación

Departamento: Física Aplicada II

Fecha de inicio del proyecto: 01/02/2014

Fecha de finalización del proyecto: 01/03/2017 (prorrogado de oficio hasta Marzo 2018)

*El personal investigador en formación adscrito al proyecto y contratado con cargo al incentivo concedido mediante Resolución SGUIT deberá incluir el informe anual de seguimiento o final, conforme a lo indicado en apartado F

SR. SECRETARIO GENERAL DE UNIVERSIDADES, INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA

c/ Johannes Kepler, 1 Isla de la Cartuja

41092 - SEVILLA

A. ACTIVIDADES REALIZADAS Y GRADO DE CONSECUCIÓN DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS

(La buena comprensión de este informe requiere la disponibilidad de la memoria original del proyecto remitida para consultar, ya que sigue el cronograma y metodología en ella establecida)

A.1. Describa las actividades realizadas durante el desarrollo del proyecto.

Las operaciones realizadas durante el primer año del proyecto MOCBASE se han desarrollado en el marco de los objetivos 1 y 2, dándose por completado el primero (salvo eventuales actualizaciones que puedan ocurrir a lo largo de los siguientes años de proyecto) y estando el segundo en fase de ser completado.

A.1.1 – Objetivo 1

El objetivo 1 contempla la recogida de información histórica en forma de observaciones y medidas in situ, con el fin de obtener una descripción general lo más detallada posible de la dinámica de la Bahía de Algeciras a distintas escalas espaciales y temporales. Durante el desarrollo del objetivo 1 se ha procedido, por tanto, a la consulta y recolección de la información observacional disponible en la Bahía, la ampliación de la misma con nuevas campañas de medidas in situ, y el aprovechamiento de los resultados de la ejecución del modelo para los fines previstos en el objetivo 2 como material complementario de esa información.

A.1.1a – Observaciones in situ

Durante los experimentos de validación previstos en el marco del proyecto SAMPA, desarrollado por el Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA) responsable del proyecto en los años 2010-2013, se llevaron a cabo una serie de campañas de medida en la Bahía de Algeciras en dos periodos del año 2011: Primavera (Marzo – Junio) y Otoño-Invierno (Octubre 2011 – Febrero 2012). En ambos periodos se desplegaron unas líneas de fondeo someras equipadas con un perfilador de corriente (ADCP) NORTEK-AWAC de 600 kHz, anclado a un trípode en un fondo de unos 20-30 metros, y una serie de líneas de fondeo profundas desplegadas en profundidades de unos 100 m estructuradas como líneas de fondeo oceánicos, con una boya subsuperficial que aloja un ADCP NORTEK-CONTINENTAL de 190 kHz, un sensor de temperatura y salinidad CT Sea-Bird 37 SMP, y un lastre que garantiza el anclaje de la línea en el fondo. El despliegue y recogida de los dos tipos de fondeos siguen protocolos distintos, siendo los primeros instalados y recuperados por buzo en tanto que los segundos son fondeados en el punto previsto desde un barco y recuperados mediante la activación de un liberador acústico que enlaza el resto de la línea con el lastre y que, una vez abierto, permite que la boya subsuperficial ascienda a superficie con el equipamiento científico para ser recuperada desde el barco también.

A finales de 2015 y comienzo de 2016, contando con la colaboración de la Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras, se realizaron otras dos series de experimentos, con el doble objetivo de integrar las observaciones realizadas en el año 2011 y proporcionar un banco de datos para la validación del futuro modelo de alta resolución, previsto en el objetivo 4 del presente proyecto. En cada periodo (Octubre–Diciembre 2015 y Diciembre 2015–Marzo 2016), se desplegaron dos líneas en un fondo de unos 250 metros, utilizando los mismos instrumentos y siguiendo un esquema muy similar al usado en el 2011 en los fondeos de 100 metros, y uno somero en un fondo de unos 30 metros, copiando el ejemplo de los análogos del 2011. El fondeo somero S1oct se fondeó en 11 metros aproximadamente.

La Figura 1 indica las posiciones de todos estos fondeos durante los dos periodos citados. Las estaciones con sufijo "J" (Junio) o "N" (Noviembre) se refieren a las campañas de SAMPA de 2011, mientras las que llevan el sufijo "oct" o "dic" son las de los experimentos que se llevaron a cabo en Octubre y Diciembre 2015. La Tabla 1 recoge la información esencial de todos los fondeos realizados. Todos los experimentos tuvieron una duración mínima de 50 días, extendiéndose a unos dos meses y medio en el caso de los fondeos profundos. Sólo el fondeo somero S1oct de la campaña 2015/16 duró unos 40 días.



Figura 1 – Ubicación de los fondeos realizados en los años 2011/12 y 2015/16. Ver texto para la interpretación de las etiquetas.

Los ADCPs instalados en los fondeos permiten obtener un perfil de corriente cubriendo casi toda la columna de agua, con una resolución vertical variable según la frecuencia del instrumento usado: 2 metros para los de alta frecuencia instalados en fondos someros y 5 metros para los profundos. El CT instalado en las líneas profundas permite obtener medidas de temperatura y conductividad con una precisión elevada $O(10^{-3} \text{ °C y } 10^{-3} \text{ mS cm}^{-1})$, mientras el termómetro instalado en el ADCP es menos exacto, tiene menor precisión (O(0.1 °C)) y una cierta latencia térmica. Por esta razón sólo se tendrán en cuenta las temperaturas registradas por los primeros para caracterizar las propiedades termohalinas de la columna de agua.

CÓDIGO	POS	ICIÓN	INSTR	PROF.	PERI	ODO	INT.	PERFIL (m) max min (intervalo)	CELDAS TOTALES
ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD		(m)	INICIO	FIN	-(min)	(ADCP)	(ADCP)
P1J	36°07.28'N	5°25.21'W	ADCP-AWAC	35	29.04.11	22.06.11	20	-33 -5 (2)	15
P3J	36°10.40'N	5°23.13'W	ADCP-AWAC	26	29.04.11	23.06.11	20	-25 -1 (2)	13
P4J	36°09.51N	5°22.30'W	ADCP-AWAC	25	29.04.11	22.06.11	20	-23 -5 (2)	10
P5J	36°04.33'N	5°25.05'W	ADCP-AWAC	29	29.04.11	23.06.11	20	-28 -4 (1)	25
U1J	36°05.53'N	5°23.66'W	ADCP-CNT CT	94 97	-29.03.11	07.06.11	$\frac{30}{1}$	-89 -14 (5)	16
U2J	36°08.32'N	5°24.31'W	ADCP-CNT CT	106 109	-29.03.11	07.06.11	$\frac{30}{1}$	-101 -11 (5)	19
U1N	36°05.53'N	5°23.66'W	ADCP-CNT	92	06.10.11	27.02.12	3	-86 -11 (5)	16
U3N	36°09.14'N	5°22.75'W	ADCP-CNT CT	94 97	-06.10.11	15.11.11	$\frac{3}{2}$	-89 -14 (5)	16
Dloct	36°05.70'N	5°23.33'W	ADCP-CNT CT	170 173	-01.10.15	14.12.15 20.11.15	10 2	-163 -23 (5)	29
D2oct	36°07.82'N	5°24.19'W	ADCP-CNT CT	204 207	-01.10.15	14.12.15	10 2	-197 -27 (5)	35
S1oct	36°09.10'N	5°25.97'W	ADCP-AWAC	11	09.10.15	19.10.15	10	-10 -2 (1)	9
D2dic	36°07.81'N	5°24.19 W	ADCP-CNT CT	180 183	-14.12.15	08.03.16	10	-173 -23 (5)	31
D3dic	36°08.59'N	5°23.49'W	ADCP-CNT CT	180 183	-14.12.15	08.03.16	10	-173 -23(5)	31
S1dic	36°10.55'N	5°24.49'W	ADCP-AWAC	30	24.11.15	27.01.16	10	-27 -3 (2)	13

Tabla 1 - Coordenadas y estadísticas de los registros obtenidos en los fondeos.

A.1.1b – Análisis armónico

En la Bahía de Algeciras, como en toda la región del Estrecho de Gibraltar, la dinámica oceanográfica está caracterizada por una fuerte predominancia de los procesos de escala mareal, definida por las fuerzas de atracción gravitacional del sistema Tierra-Luna-Sol. Los flujos movidos por estas fuerzas sobrepasan siempre a los asociados al intercambio medio y llegan a ser un orden de magnitud superiores a los de la escala subinercial, conducidos por la variabilidad atmosférica (viento y, sobre todo, campo de presión atmosférica), que son los segundos en importancia [*García Lafuente et al.*, 2002]. La escala mareal es por tanto la que aporta más energía al sistema. El análisis armónico de las variables medidas [*Pawlowicz et al.*, 2002] es la herramienta por excelencia para evaluar cómo responde la Bahía a la interacción con la fuerte dinámica mareal del adyacente Estrecho de Gibraltar.

Nivel del mar

La primera variable que se considera es el nivel del mar, estimado por el sensor de presión del ADCP considerando válida la aproximación hidrostática de la columna de agua a la escala mareal. El análisis armónico, en el caso de una variable escalar, devuelve un valor de amplitud y fase para cada frecuencia (constituyentes armónicas), que nos permite estimar la importancia relativa de aquella constituyente respecto al conjunto de armónicos y la temporalidad con la que ésta actúa. Como referencia para las medidas in situ de nivel del mar, utilizamos las constantes armónicas calculadas sobre la serie observada por el mareógrafo del Puerto de Algeciras (TG en Figura 1) gestionado por Puertos del Estado dentro de la red REDMAR, en funcionamiento desde el 2009 (http://portus.puertos.es/). El mareógrafo registra una amplitud y una fase para las constituyentes semidiurnas lunar M₂ y solar S₂, que son las que dominan la variabilidad del nivel del mar, de 32.3 y 11.75 cm y 48.92 y 76.94 grados, respectivamente. La constituyente lunar es casi tres veces la solar, tal y como predice la teoría del potencial generador de marea y como ya ha sido confirmado previamente en esta zona *García Lafuente et al.* [1990]. Por ello, en adelante nos centraremos principalmente en la primera de ellas, M₂. La

Tabla 2 muestra sus valores de amplitud y fase obtenidos de los registros de presión de los ADCPs instalados en los fondeos.

ESTACIÓN	Amplitu	ıd (cm)	Fase	(grados)	
P1J	32.6 ±	0.5	49.0	± 1.0	
P3J	33.3 ±	0.7	49.0	± 1.5	
P4J	32.4 ±	1.2	54.5	± 2.0	
P5J	32.0 ±	0.5	46.0	± 1.0	
U1J	29.5 ±	0.3	47.0	± 1.0	
U2J	30.4 ±	0.3	47.5	± 1.0	
U1N	29.0 ±	0.4	49.0	± 1.0	
U3N	30.2 ±	0.4	49.5	± 1.0	
Dloct	29.6 ±	0.5	47.9	± 0.9	
D2oct	29.4 ±	0.5	48.5	± 0.9	
Sloct ¹	39.0 ±	40	63.5	± 58.7	
D2dic	30.5 ±	0.6	47.4	± 1.3	
D3dic ²	31.1 ±	2.0	44.9	± 2.9	
S1dic	33.2 ±	1.1	47.32	± 1.9	

Tabla 2 – Constantes armónicas para la constituyente M_2 del nivel del mar medido por los sensores de presión de los ADCPs.

¹ El fondeo S1oct se encuentra muy somero y es muy probable que la señal semidiurna del nivel del mar esté distorsionada por los efectos de fricción del fondo.

² El registro de presión del fondeo D3dic contiene un alto nivel de ruido, que reduce parcialmente la fiabilidad del resultado del análisis armónico.

Casi todos los fondeos presentan valores en muy buen acuerdo con las constantes derivadas del mareógrafo, y reflejan una muy baja variabilidad de la amplitud y una fase casi constante para la onda de marea dentro de la Bahía. Este resultado es muy coherente con lo esperado en base a estudios anteriores de la marea superficial en el Estrecho [*Candela et al.*, 1990; *García Lafuente et al.*, 1990].

El nivel del mar en el Estrecho se comporta como una onda estacionaria, con un nodo (mínima amplitud) en el Mediterráneo a la altura de Alicante y un antinodo (máxima amplitud) en el extremo Atlántico, correspondiendo aproximadamente con el meridiano de Cádiz [*García Lafuente et al.*, 1990]. Dadas las reducidas dimensiones de la Bahía de Algeciras frente a las del Estrecho, el resultado esperable y que, de hecho, se obtiene es que en toda la

zona de la Bahía la amplitud es muy constante y apenas se observan cambios de fase.

Corriente barotrópica

La corriente barotrópica se entiende como el promedio vertical del perfil de corriente horizontal en toda la columna de agua y proporciona información sobre la dinámica integrada responsable del aumento y disminución del volumen de agua que entra y sale de la bahía. Cuando la dinámica del nivel del mar sigue el comportamiento de una onda estacionaria, como es el caso de la Bahía, la corriente barotrópica está relacionada con el nivel del mar, con una relación de fase que de cuadratura: la fase de la primera anticipa la segunda de 90 grados. En otras palabras, la corriente alcanza su máximo cuando el nivel del mar se encuentra a mitad de camino entre la baja y la pleamar, es decir en marea llenante, y vice-versa.

Puesto que el nivel del mar en la Bahía presenta una fase de ~50 grados, la corriente barotrópica debería tenerla alrededor de los 320 grados. La Tabla 3 muestra los resultados del análisis armónico de la corriente barotrópica en las estaciones analizadas. En el caso de cantidades vectoriales, el análisis armónico devuelve constantes armónicas más complejas que las de variables escalares. La variabilidad mareal de la corriente se describe a través de una elipse que tiene su semieje mayor orientado en la dirección que la corriente sigue cuando alcanza su máxima amplitud (inclinación), el valor del semieje mayor indica la propia amplitud de la constituyente analizada, y el semieje menor la excentricidad de la elipse, de modo que la relación entre los dos semiejes informa sobre el carácter de bidireccional de la corriente: cuanto más elevado el ratio entre semieje mayor y menor, más pronunciada será la inversión de sentido de la corriente durante el cambio de marea. La transición entre el máximo de corriente en una dirección y en la dirección contraria ocurre mediante rotación del vector de corriente, que es antihoraria si el signo del semieje menor es positivo y vice-versa. Finalmente el momento en el cual la corriente alcanza su máximo lo indica la fase, referida al meridiano de Greenwich como en el caso de magnitudes escalares (por ejemplo, el nivel del mar) donde los grados indican el retraso temporal que, a su vez, depende del periodo de la constituyente armónica analizada (unos 29 grados por hora en el caso de M_2) respecto al instante en el cual la luna transita por ese meridiano.

Tabla 3 – Constantes armónicas para la constituyente M ₂ de la corriente barotrópica. Los
símbolos A, a, θ y ϕ indican amplitud del semieje mayor, amplitud del semieje menor,
inclinación (0º = Este) y fase, referida al meridiano de Greenwich. La columna % indica el
porcentaje de varianza de la corriente barotrópica explicado por la marea.

ESTACIÓN	A (cm/s)	a (cm/s)	θ (grados)	φ (grados)	%
P1J	19.5±3.7	$0.0{\pm}1.0$	83±2	321±11	51.6
P3J	3.3±1.4	0.1±0.2	106±12	344±14	23.5
P4J	8.5±1.5	-0.1±1.0	113±7	340±10	47.9
P5J	12.6 ± 4.2	-1.7±2.0	67±11	360±20	44.6
U1J	9.1±1.7	-2.1±1.7	118 ± 8	350±12	49.3
U2J	4.2 ± 0.8	-1.0 ± 0.8	71±7	319±12	38.0
U1N	5.4±1.6	-0.4±2.0	150±26	313±17	37.7
U3N	3.0±0.9	-1.2±1.0	118±17	320±22	41.2
D1oct	2.8 ± 0.7	-1.5±1.0	15±32	126±24	22.2
D2oct	3.5±1.1	0.4±0.3	95±6	139±19	19.7
S1oct	0.6±1.1	-0.4 ± 0.8	175±68	41±166	6.3
D2dic	$1.4{\pm}1.1$	-0.3±0.5	113±20	195±48	10
D3dic	2.7±1.3	0.2 ± 0.5	75±12	194±34	11
S1dic	2.5±1.1	0.1±0.2	180±4	56±22	9

La mayor parte de los fondeos del periodo 2011/12 reflejan con buena aproximación el valor de la fase esperado para una cuadratura entre nivel del mar y corriente barotrópica (~320 grados), mientras sorprendentemente los fondeos del experimento llevado a cabo en 2015/16 divergen de esa referencia. Es cierto, sin embargo, que la varianza explicada es notablemente más baja que la mayoría de los fondeos anteriores, lo que nos hace pensar que la débil señal mareal de las corrientes en la Bahía esté en este caso bastante contaminada por el ruido, que afecta negativamente al resultado del análisis armónico. Se anticipa que los análisis de la estructura baroclina de esos fondeos, sí proporciona resultados coherentes con esa cuadratura.

La imagen global que proporciona el análisis armónico de nivel del mar y corriente barotrópica es un cuadro en el cual el primero aumenta de manera uniforme con la corriente barotrópica cuando esta se dirige hacia el interior de la bahía (inclinación promedio de las elipses de alrededor de 110 grados). Es decir, independientemente de la estructura vertical de la corriente que se estudia a continuación, el promedio vertical de la corriente horizontal en toda la columna de agua da una velocidad tal que la variación del nivel del mar positiva (aumento de volumen de

agua en la Bahía) se debe al flujo neto de agua procedente del Estrecho que entra a través de su contorno meridional abierto.

Corriente baroclina

La dinámica del Estrecho de Gibraltar es conocida por su carácter fuertemente baroclino [*Armi and Farmer*, 1988; *Farmer and Armi*, 1988; *Bryden and Kinder*, 1991; *Bryden et al.*, 1994; *Sannino et al.*, 2007; *Sánchez Román et al.*, 2008; *García Lafuente et al.*, 2013]. La columna de agua no se mueve de manera uniforme, sino que está caracterizada por la corriente de fondo de agua Mediterránea que sale hacia el Atlántico y la de agua Atlántica que entra en el Mediterráneo por su superficie, lo que dibuja un paradigma de flujo típicamente baroclino. Ambas corrientes tienen caudales medios próximos al millón de metros cúbicos de agua por segundo que se mueven en direcciones opuestas [*Sánchez Román et al.*, 2008; *Sánchez Román et al.*, 2009; *Sammartino et al.*, 2015]. La marea modula esta choque y deforma ese flujo baroclino bidireccional llegando a invertir la corriente en alguna de las capas para convertir el flujo instantáneo en unidireccional con un caudal que puede llegar a ser de hasta 4 o 5 veces superior al flujo medio en cada capa.

La Bahía de Algeciras no es ajena a este intercambio baroclino y, dada su profundidad y dimensiones, se espera que esté caracterizada por una estructura también baroclina importada desde su exterior. La Figura 2 confirma esta suposición, presentando los perfiles de constantes armónicas de la M₂ calculadas para la corriente horizontal en el fondeo D1oct, ubicado en el flanco occidental del cañón de Algeciras (ver Figura 1), como ejemplo de esa previsible estructura baroclina de la Bahía. Los perfiles de amplitud y fase reflejan la clara baroclinidad de la corriente: la amplitud muestra un mínimo en torno a los 70-80 metros de profundidad, coincidente con el máximo gradiente de la fase, que en esa profundidad cambia bruscamente desde los 110 grados aproximadamente de la capa inferior hasta los 315 grados aproximadamente de la capa superior.



Figura 2 – Perfiles verticales de las constantes armónicas calculadas para la constituyente M₂ de la corriente en el fondeo D1dic.

Este resultado del análisis armónico nos permite dar un paso más en la interpretación de la dinámica mareal de la Bahía. El desfase entre la capa superior e inferior, separadas por esa interfaz que se centra en los 70-80 m de velocidad mínima (casi nula, de hecho, ver Figura 2), es de unos 180 grados (oposición de fase), mientras la inclinación, que indica la orientación de la corriente respecto al Este geográfico cuando ésta alcanza su máximo, varía muy poco. Todo apunta a una estructura baroclina muy clara, con una corriente bidireccional bien definida en la que las dos capas se mueven en direcciones opuestas: cuando la capa superior presenta la máxima velocidad entrante en la Bahía, la inferior lo hace en dirección saliente al Estrecho. Esta situación se invierte en el semi-ciclo de marea siguiente. También se observa cómo la fase de la velocidad en la capa superior es coherente con la de la corriente barotrópica (alrededor de 320 grados, Tabla 3), lo cual significa que es la capa superior la que queda en cuadratura con el nivel del mar, es decir es el agua de la capa superior la que entra en la Bahía en marea llenante mientras que la de la capa inferior sale de la Bahía hacia el Estrecho durante ese semi-ciclo de marea. El balance, sin embargo, no puede ser nulo sino que el flujo entrante debe exceder al saliente en una pequeña cantidad que es la

Temperatura y salinidad

Para completar la descripción de la dinámica baroclina de la Bahía sólo queda enlazar lo dicho para la corriente con la variabilidad de las propiedades termohalinas del agua. No disponemos de perfiles de temperatura y salinidad, sino de medidas puntuales, cuya fiabilidad estadística está limitada a los CT instalados en los fondeos profundos. Estos aparatos se fijaron justo debajo de la boya donde iba instalado el ADCP (ver Tabla 1) y por tanto son representativos de la variabilidad de la capa inferior. Sabemos que en el Estrecho, la estructura vertical de las masas de agua es la de aguas Mediterráneas (más salinas, frías y por tanto más densas) en el fondo, y aguas Atlánticas (menos salinas, más cálidas y por tanto más ligeras) en la superficie.

El paso de la onda de marea que, por lo que acabamos de ver en la dinámica baroclina de la corriente, genera un flujo entrante de la capa superior en marea llenante, se debe registrar en el CT como un progresivo aumento de la temperatura y su correspondiente disminución de la salinidad. Lo contrario debe de pasar en marea vaciante.

La Tabla 4 muestra los resultados del análisis armónico realizado en los registros de temperatura y salinidad de los CTs instalados en los fondeos profundos. Las fases de la M₂ de temperatura y salinidad confirman este postulado: la temperatura alcanza su máximo unos 90 grados después del máximo de corriente de la capa superior, es decir cuando la velocidad cruza el cero. En cambio la salinidad, que está en oposición de fase con la temperatura, alcanza su mínimo en esas circunstancias. En definitiva la temperatura y la salinidad están en oposición de fase. Cuando la Bahía acaba de llenarse con agua atlántica (en el reparo de la pleamar) las características termohalinas registradas reflejan las temperaturas más altas y las salinidades más bajas del ciclo de marea. En bajamar ocurre lo contrario: la Bahía acaba de llenarse de agua Mediterránea y alcanza su mínimo de temperatura y máximo de salinidad.

ESTACIÓN		Media	A (°C PSU)	<pre></pre>	%
U1J	Temperatura	13.9	0.26 ± 0.04	24±8	39.7
	Salinidad	37.9	0.13±0.02	205±8	37.3
UOI	Temperatura	13.9	0.44 ± 0.08	35±11	50.4
U2J	Salinidad	38.0	0.20 ± 0.04	216±11	47.9
U2N	Temperatura	14.2	0.48 ± 0.12	357±14	45.5
USIN	Salinidad	38	0.17 ± 0.04	183±15	47.0
D1oct	Temperatura	13.5	0.09 ± 0.03	5.6±18	21.5
	Salinidad	38.3	0.05 ± 0.02	190±20	28.5
Dloat	Temperatura	13.4	0.07 ± 0.02	4.7±16	28.0
D20Cl	Salinidad	38.3	0.04 ± 0.01	186±17	30.5
D2dic ·	Temperatura	13.3	0.05 ± 0.02	44 ± 18	9.2
	Salinidad	38.4	0.03 ± 0.01	227±22	10.1
D3dic -	Temperatura	13.5	0.21±0.06	39±15	52.4
	Salinidad	38.3	0.12±0.04	220±19	48.3

Tabla 4 – Constantes armónicas de la constituyente M_2 calculadas para las series de temperatura y salinidad en los fondeos profundos.

Todo lo anterior permite dibujar un esquema del funcionamiento a escala mareal de la Bahía de Algeciras (Figura 3). Durante la fase de marea llenante (flood tide en inglés) la entrada de agua Atlántica por superficie es superior a la salida de agua Mediterránea por el fondo, siendo el exceso de agua entrante el causante del aumento del nivel del mar. Simultáneamente, la interfaz entre ambas capas debe descender para alojar el flujo da agua Atlántica que entra, descenso que a su vez ocasiona la evacuación de agua Mediterránea por el fondo. Durante la fase de marea vaciante (ebb tide) ocurren los procesos contrarios: la interfaz sube debido a que entra una cantidad de agua Mediterránea por el fondo y obliga a evacuar parte del agua Atlántica acumulada en la Bahía durante la fase de llenante. La cantidad de esta agua evacuada supera la de agua entrante en profundidad y, consecuentemente, el nivel del mar disminuye.

De todo anterior se concluye que a escala mareal la circulación de la Bahía de Algeciras es fundamentalmente bidireccional y bicapa, cada capa moviéndose de forma periódica y coherentemente en una dirección durante un semi-ciclo de la marea (pero a su vez en dirección contraria a la otra) y cambiando su dirección en el semi-ciclo siguiente. En este sentido no parece una buena decisión hablar de corriente media, mostrándose como mejor descriptor de la dinámica mareal las propias elipses de marea. La Figura 4 resume la estructura de circulación a escala mareal para la constituyente semidiurna lunar, que es la que prevalece sobre las demás, a través de las elipses de mareas calculadas para la corriente horizontal.



Figura 3 – Esquema funcional del intercambio baroclino que ocurre en la Bahía, a escala mareal. Durante la marea llenante (flood) el agua atlántica (flechas verdes) entra en la Bahía en las capas superiores, proporcionando el aumento del nivel del mar y el hundimiento de la interfase (superficie celeste y flechas grises). Por continuidad el agua Mediterránea (flechas rojas) se ve empujada fuera de la Bahía por las capas inferiores. Lo contrario pasa en marea vaciante (ebb).



Figura 4 – Elipses de marea de la M₂ para la corriente horizontal, calculadas en todos los fondeos realizados en la Bahía. Ver texto para una interpretación más detallada

Las elipses están orientadas principalmente a lo largo del eje longitudinal (norte-sur) de la Bahía, revelando un flujo entrante y saliente a través del contorno meridional que conecta con el Estrecho. En las estaciones profundas las elipses siguen la dirección del cañón, que evidentemente hace de constricción topográfica para el flujo entrante y saliente. En el fondeo S1dic las elipses son trasversales a esta dirección, sugiriendo que las corrientes que llegan al extremo septentrional de la Bahía, viran y se orientan según la conformación de la costa. Las elipses superficiales, representativas de la capa atlántica, de los fondeos U1N, U1J y D1oct están rotadas unos 50 grados con respecto a las más profundas, indicativas de la dinámica de la capa mediterránea (ver también Figura 2), señal de que la corriente superficial en la entrada de la Bahía está influenciada más por la interacción con la dinámica externa que procede del Estrecho (el jet Atlántico) que por la topografía interna de la propia Bahía. El fondeo P5J

muestra una rotación opuesta a estos últimos, indicando la presencia de algún tipo de estructura de escala pequeña (eddy) que pueda cerrar la compleja dinámica en la boca de la Bahía (ver Figura 9).

A.1.1d – Simulaciones numéricas

Las observaciones representan el dato por excelencia con el que se obtiene un reflejo fiel de la dinámica del fenómeno objeto de estudio (dentro del margen del error de la medida). Sin embargo, las enormes complicaciones logísticas y los elevados costes que la oceanografía experimental implica limitan considerablemente el número de experimentos y su duración. Además, el cuadro que las observaciones permiten dibujar a menudo carece de sinopticidad y de una buena resolución espacial.

Los modelos matemáticos de circulación oceanográfica representan una herramienta muy válida para compensar ese hueco de información. Siempre y cuando el modelo esté satisfactoriamente validado, es decir se demuestre que el grado de coherencia entre lo simulado y lo observado es suficientemente alto, éste es capaz de proporcionar un cuadro de la dinámica del fenómeno en cuestión con una continuidad y una resolución espacial inalcanzables por las observaciones. Las escalas temporales resueltas por los modelos, que dependen recíprocamente de la resolución espacial del mallado de simulación, también son continuas y típicamente cubren periodicidad desde pocas horas a varios meses o años.

El grupo GOFIMA, en el marco del proyecto SAMPA, ha desarrollado un modelo hidrodinámico tridimensional del Estrecho de Gibraltar, con un dominio que incluye el Golfo de Cádiz y la cuenca del Mar de Alborán. La resolución del mallado curvilíneo en el cual se resuelve el modelo es variable y alcanza su máximo en la Bahía de Algeciras, donde el tamaño de las celdas alcanza los 300 metros aproximadamente (Figura 5).



Figura 5 – Dominio y mallado del modelo desarrollado por el grupo GOFIMA. Derecha: particular en la Bahía de Algeciras.

El modelo está forzado en los contornos laterales por condiciones de contorno prescritas por el modelo general de circulación del Mediterráneo desarrollado por el Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología Italiano [*Oddo et al.*, 2009], en términos de velocidad horizontal, temperatura y salinidad baroclinas, y el modelo barotrópico NIVMAR [*Fanjul et al.*, 2001], en términos de velocidad trasversal barotrópica, que integra el efecto de la modulación subinercial de los flujos debida a los campos de presión. En superficie recibe el forzamiento del modelo meteorológico HIRLAM de la Agencia Estatal de Meteorología Española [*Cats and Wolters*, 1996], en términos de stress del viento, temperatura y humedad del aire, radiación solar y precipitación. Las velocidades laterales están forzadas con 8 constituyentes de mareas derivados del modelo MOG2D-G [*Carrère and Lyard*, 2003]. Más detalles sobre las características principales del modelo se pueden encontrar en *Sánchez Garrido et al.* [2013], *Sammartino et al.* [2014] y *Sánchez Garrido et al.* [2014]. La muy satisfactoria validación del modelo, que se detalla en esos trabajos, nos permite confiar en las simulaciones y completar la descripción de la dinámica de la Bahía, incluyendo también la escala subinercial, que de otra forma no se hubiera podido evaluar.

Escala mareal

La Figura 6 muestra las elipses de marea de la constituyente M_2 simuladas por el modelo en la capa superficial (izquierda), representativa de la dinámica atlántica, y a 180 metros de profundidad (derecha), representativa de la dinámica mediterránea. Las ventajas respecto al análisis de los datos experimentales saltan a la vista en términos de resolución espacial y cobertura: la estructura dinámica de la constituyente semidiurna, a pesar de quedar ya bastante clara y coherente en la Figura 4, ahora resulta mucho más detallada y completa.



Figura 6 – Elipses de marea para la constituyente M₂ de la corriente horizontal y fase en escala de color. Izquierda: superficie. Derecha: -180m.

La orientación de las elipses en la Bahía en ambas capas ronda los 120 grados, de acuerdo con el forzamiento topográfico de la costa y del fondo. La fase en la capa Atlántica aumenta unos 50 grados desde la boca al extremo interior, confirmando el desfase observado en las medidas (Tabla 3). Lo más interesante es la clara oposición de fase entre ambas capas. La superficial presenta una fase de unos 320 grados, en cuadratura con el nivel del mar, mientras la capa Mediterránea se ajusta alrededor de los 130-140 grados, en oposición de fase con la superficial.



Fig. 5. Amplitude and phase of the meridional velocity in the CE (panel a and b) and MH (panel c and d) vertical sections for M_2 . Mean positions of $S_{At} = 36.6$, $S_{Me} = 38.2$ and S = 37.5 are plotted for reference.

Figura 7 – Amplitud y fase de la constituyente M_2 en una sección trasversal en la boca de la Bahía (CE) y longitudinal (MH). Algunas isohalinas de referencia acompañan los mapas. De *Sammartino et al.* [2014].

El flujo en la capa superficial parece tener doble origen: por un lado está asociado al Jet Atlántico, que vira a la altura de la boca de la Bahía (con una fase de unos 200 grados coherente con lo observado por *García Lafuente et al.* [2000]), y entra pegándose hacia el extremo occidental de la misma, y por otro depende de una corriente con dirección suroeste que fluye pegada a la costa en el extremo noroeste de la cuenca de Alborán [*García Lafuente and Lucaya*, 1994; *Sarhan et al.*, 2000; *Macías et al.*, 2008], y entra en la Bahía rodeando el Peñón de Gibraltar con fuertes aceleraciones en torno a Punta Europa. El origen del influjo en la capa mediterránea, en cambio, parece ser más claramente occidental, de agua procedente del Estrecho. En este caso la fase es de unos 130 grados, de nuevo muy coherente con lo observado por *García Lafuente et al.* [2000].

La dinámica mareal de la Bahía de Algeciras ha sido objeto de estudio de un trabajo publicado en la revista *Continental Shelf Research* por los investigadores del grupo GOFIMA [*Sammartino et al.*, 2014], que describe de forma completa la circulación caracterizada por la fuerte periodicidad semidiurna. Los mapas de amplitud y fase de la M₂ calculadas en una sección trasversal y longitudinal en la Bahía, por ejemplo, muestran la clara baroclinidad de la corriente que atraviesa el contorno meridional y caracteriza el flujo a través de éste (Figura 7).

El mínimo de amplitud coincide con el máximo gradiente vertical de la fase (y con la isohalina de 37.5 PSU, un muy buen indicador de la picnoclina), reflejando la presencia alrededor de los 70-80 m de profundidad de una capa interfacial donde tiene lugar la inversión de corriente entre las capas atlántica y mediterránea. También se observa la no homogeneidad trasversal de la amplitud de la M_2 en la capa superior, que presenta un máximo en el flanco oriental donde vimos que la corriente procedente de la cuenca de Alborán aceleraba notablemente (Figura 6), y en la capa inferior, que presenta una (más leve) desviación del máximo hacia el margen occidental.

Un dato interesante obtenido a partir de las simulaciones numéricas concierne al flujo a través del contorno meridional (Figura 8). El transporte baroclino es del orden de $1x10^{-2}$ Sv (1 Sv = $1x10^{6}$ m³ s⁻¹) en ambas capas, mientras el resultante flujo neto es una orden de magnitud más bajo, evidencia de la fuerte supremacía del intercambio baroclino frente al barotrópico.



Fig. 8. Time series of inflow and outflow across CE section. The net flow, which is the sum of these series, is the small-amplitude red line that fluctuates around the zero mean value. A fourteen-day zoom of this series is displayed in the inset on the lower-right corner. Thick lines in the inflow and outflow series correspond to daily means and illustrate their subtidal fluctuations. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this paper.)

Figura 8 - Serie de flujo entrante, saliente y neto a través del contorno meridional de la Bahía. De Sammartino et al. [2014].

Escala submareal

Con las observaciones hemos podido describir de manera relativamente fragmentada pero con buena aproximación la dinámica mareal. Las simulaciones numéricas, si están bien validadas, compensan los huecos de información inherentes a las observaciones y ayudan notablemente a dibujar un esquema completo de la circulación. Sin embargo, cuando pasamos a la escala temporal submareal, la escala espacial de los fenómenos analizados aumenta notablemente y las observaciones ya no son suficientes para describirlos. Nos vemos obligados, por tanto, a centrarnos en los resultados de las simulaciones numéricas.

La dinámica submareal, caracterizada por una periodicidad de varios días, que está principalmente condicionada por los fenómenos atmosféricos, el viento y el campo de presión atmosférica. Los investigadores del grupo GOFIMA han analizado la dinámica de la Bahía de Algeciras a escala submareal en un trabajo publicado en la revista *Marine Pollution Bulletin [Sánchez Garrido et al.*, 2014], donde se describe la influencia del viento y de la modulación barotrópica del flujo en el Estrecho en la circulación de la Bahía.

Antes de resumir brevemente resultados de ese trabajo, se quiere hacer un inciso para subrayar un resultado curioso y meritorio. La Figura 9 muestra dos imágenes de la circulación superficial de la Bahía muy similares: ambas describen una celda anticiclónica alimentada por la corriente procedente de Alborán; ambas describen una inversión ciclónica de corriente frente a Punta Carnero, que cierra el esquema entre la corriente suroeste de la boca de la Bahía y el Jet Atlántico. Lo que admira y sorprende es el hecho de que, frente al resultado de la simulación

numérica de alta resolución (imagen izquierda), la imagen derecha esté elaborada en 1924, casi un siglo antes, a partir de pocas decenas de muestras de sedimento de la franja costera en el interior de la Bahía [*Buen*, 1924].



Figura 9 – Circulación promedia superficial de la Bahía de Algeciras, de *Sánchez Garrido et al.* [2014] a la izquierda y de *Buen* [1924] a la derecha.

Un resultado interesante presentado en *Sánchez Garrido et al.* [2014] es la influencia del viento sobre la circulación de la Bahía. La Figura 10 muestra la circulación superficial durante dos episodios de vientos de Levante y de Poniente. La circulación típica sigue la deriva de Ekman, que prevé acumulación (drenaje) de agua en la Bahía durante los episodios de Levante (Poniente). Observando lo que ocurre en la boca de la Bahía, se puede ver como el intercambio entre las masas de agua es más complejo de lo que aparece en superficie.



Figura 10 - Circulación superficial (panel superior) y sección trasversal en la boca de la Bahía (panel inferior)

El efecto (remoto) del campo de presión atmosférica también ha sido estudiado por *Sánchez Garrido et al.* [2014], analizando la relación entre las funciones ortogonales empíricas de la corriente trasversal en la boca de la Bahía y la serie subinercial del flujo neto en el Estrecho. La Figura 11 muestra la corriente subsuperficial (27.5 metros de profundidad) durante dos episodios de flujo neto negativo y positivo.



Fig. 8. (a) Daily mean velocity field at z = 27.5 m depth on April 5. The low-frequency net transport at that time was $Tr_s = -0.78$ Sv (see Fig. 7b). The panel on top shows a close-up of the bay area. (b) Same as (a) for April 9. $Tr_s = 0.82$ Sv.

Figura 11 – Dos ejemplos de campo de corriente a 27.5 metros de profundidad durante dos episodios de flujo neto negativo (izquierda) y positivo (derecha).

Según el gradiente de presión atmosférica entre la cuenca de Alborán y el Golfo de Cádiz sea negativo (alta presión en Alborán respecto al golfo de Cádiz) o positivo, el flujo en el Estrecho de Gibraltar está afectado por una componente barotrópica negativa (flujo hacia el Oeste) o positiva (hacia el Este) que modifica el valor promedio positivo del flujo neto [*García Lafuente et al.*, 2002]. El panel izquierdo de la Figura 11 muestra una situación de flujo neto negativo en el Estrecho durante el que el Jet Atlántico mengua, vira hacia la Bahía y llega a contrarrestar la corriente procedente de la costa noroeste de Alborán que normalmente entra en la Bahía (Figura 9). Al entrar en la Bahía pegado a la costa de Gibraltar, el Jet describe un giro ciclónico. En condiciones opuestas, cuando el flujo neto en el Estrecho es positivo, el Jet Atlántico acelera, se separa de la boca de la Bahía, y favorece la intrusión de la corriente del norte de Alborán, que, a su vez, vuelve a instaurar un giro anticiclónico en el interior de la Bahía.

Conclusiones

Las tareas previstas en el Objetivo 1, recopilación de observaciones y su utilización para definir patrones de circulación en la Bahía, ha sido llevada a cabo satisfactoriamente. Se ha reanalizado la serie de observaciones recogidas durante el proyecto SAMPA y añadido nuevas medidas realizadas en el invierno 2015-2016 con el doble objetivo de completar aquellas observaciones del 2011 y construir un banco sólido de datos para la validación del futuro modelo de alta resolución (objetivo 4). Además de la información observacional, aprovechando las tareas de ejecución del modelo para los fines del objetivo 2, se han utilizado salidas de simulaciones numéricas para completar el esquema de circulación definido por las observaciones y se ha extendido éste a la escala subinercial.

En cuanto a los otros tipos de observaciones complementarias citadas en la memoria del proyecto, queremos hacer constar la inaplicabilidad de ellas para los fines descriptivos de la dinámica de la Bahía. Los datos procedentes de las estaciones RADAR-HF de Puertos del Estado no cubren con suficiente confianza estadística la zona interior de la Bahía y se limitan a describir la entrada en el contorno meridional [*Soto-Navarro et al.*, 2016; *Sotillo et al.*, In press]. Por otro lado, también se han analizado los datos de temperatura superficial del mar observada por satélite

proporcionados por CMEMS (<u>http://marine.copernicus.eu/</u>), que engloban la Bahía de Algeciras con una resolución aceptable de 1 km, aunque con una escasa cobertura temporal (datos L3). Sin embargo el análisis no ha proporcionado soluciones concluyentes sobre la dinámica superficial de la Bahía, y finalmente su inclusión en este análisis se ha descartado.

Con la información detallada en este capítulo, se da por concluido el primer objetivo del proyecto MOCBASE.

A.1.2 – Objetivo 2

Las tareas previstas en el objetivo 2 están orientadas al estudio de la capacidad que tiene la Bahía de renovar sus aguas drenándolas hacia el Estrecho. Se quieren estimar tiempos de renovación de aguas superficiales y profundas, utilizando el modelo numérico como instrumento de diagnosis de la respuesta de la Bahía a distintos forzamientos mareales y subinerciales. La metodología a seguir está diferenciada en dos fases: durante la primera el esfuerzo se centra en validar el modelo y, una vez validado satisfactoriamente, en la segunda se realizarán las estimaciones de tiempos de renovación bajo forzamientos distintos. En el momento de redactar el presente informe, se ha completado la primera fase durante la cual se han ejecutado dos hindcast (reconstrucciones de periodos pasados bajo forzamientos reales) y, sobre esos experimentos, se ha validado el modelo. Por lo que concierne a la segunda fase, se han realizado las primeras estimaciones de tiempos de renovación global y se está trabajando en ejecutar experimentos ad hoc para evaluar la capacidad de renovación en áreas concretas de la Bahía, aunque aún no se tienen resultados definitivos sobre ellos.

A.1.2a Validación del modelo

Aunque sin hacer mención explícita, la sección anterior ha comentado la similitud entre las observaciones y los datos del modelo, que en esencia puede considerarse como tareas de validación. Buena parte de esas comparaciones se centran en aspectos barotrópicos, es decir, aquéllos aspectos en los que la bahía tiende a comportarse como un fluido uniforme (por ejemplo, la marea vertical u oscilación del nivel del mar) aunque también se ha analizado el comportamiento de la marea interna o baroclina. En este apartado se incide algo más sobre estos aspectos baroclinos puesto que, evidentemente, los procesos de renovación son de carácter fuertemente baroclino en el sentido de que cuando se evacúa, por ejemplo, agua superficial Atlántica, debe compensarse el volumen saliente por otro entrante (por el fondo o por superficie a través de una sección distinta de la usada para evacuar) a fin de mantener aproximadamente constante el nivel del mar en la Bahía.

Este estudio de validación se centra sobre las dos escalas temporales más energéticas, la mareal y la submareal. Los resultados de la validación del modelo están detalladamente descritos en los trabajos de *Sammartino et al.* [2014] para la escala mareal y *Sánchez Garrido et al.* [2014] para la submareal y a ellos nos remitimos para mayor información. No obstante, se muestran a continuación algunos resultados extraídos de esos trabajos que ilustran el alto grado de confianza que tienen las salidas numéricas para la escala mareal (Figura 12) y para la submareal (Figura 13).

Aunque la variable crítica para validar un modelo hidrodinámico es la velocidad, dado el carácter baroclino que predomina en ambas escalas temporales, la respuesta a los forzamientos externos producen movimientos verticales que a su vez originan fluctuaciones locales en las variables hidrológicas (temperatura, salinidad). Por esta razón, las observaciones de estas variables tomadas en un punto fijo también encierran información sobre estos procesos. Consecuentemente, además de las observaciones de corriente tomadas por el ADCP, las medidas de salinidad adquiridas por los CTs instalados en los fondeos profundos (ver Figura 1 y Tabla 1) son muy adecuadas para llevar a cabo los ejercicios de calibración/validación del modelo.

La Figura 12 muestra los resultados de un ejercicio de calibración/validación hecho con medidas de salinidad tomadas por el CT instalado en uno de los fondeos profundos y de corriente observada por el ADCP en un fondeo somero y en otro profundo para la escala mareal. El modelo reproduce de manera muy satisfactoria la variabilidad en esta escala temporal, tanto para las corrientes como para la salinidad, indicadora de los movimientos verticales comentados anteriormente asociados a la marea interna (baroclina) en los fondeos profundos. En estos últimos en particular, el análisis de las corrientes permite apreciar la capacidad del modelo de reproducir la estructura baroclina de la columna de agua. Algo menos efectiva es la performance del modelo en aguas más someras, donde la resolución posiblemente no sea suficiente para resolver una estructura de corriente prevalentemente barotrópica y fuertemente influenciada por la fricción del fondo.



are the phase referred to Greenwich. (1) Time series of meridional component of the velocity in station U2s. Observations, sampled at a higher rate than modeled outputs, have been smoothed slightly to match the hourly interval of the latter.

Figura 12 – Ejemplos de validación del modelo a escala mareal, en términos de salinidad y corriente. De [Sammartino et al., 2014]

En la Figura 13 se muestran algunos de los ejemplos de validación del modelo realizados en la segunda escala de interés, la submareal. Al igual que ocurre en la mareal, el modelo es capaz de reproducir satisfactoriamente la variabilidad a escala submareal (periodos del orden de varios días). Respecto a las variables pasivas o trazadores (temperatura, salinidad), tanto en las estaciones someras como en las profundas el residuo que se obtiene entre las salinidades y temperaturas simuladas y las observadas (diferencia entre ambas) es muy inferior al rango de variabilidad que la variable exhibe en la serie. La concordancia con las corrientes submareales (corrientes a las que se ha eliminado la componente mareal por filtrado numérico) es todavía mejor.



Figura 13 – Ejemplo de validación del modelo a escala submareal, en términos de salinidad, temperatura y perfiles de corriente. Adaptado de *Sánchez Garrido et al.* [2014].

A.1.2b Renovación de agua

La capacidad de la Bahía de renovar sus aguas depende de diversos factores y es esperable que tanto la marea y los vientos (forzamientos externos), como las diferencias entre las masas de agua que ocupan la Bahía (características intrínsecas) contribuyan a la complejidad del escenario. Utilizando resultados del modelo calibrado, unos resultados preliminares de este tipo de análisis ya aparecen publicados en el trabajo de *Sánchez Garrido et al.* [2014].

Una primera estimación se puede realizar considerando los volúmenes de agua de las dos capas y los transportes asociados a cada una de ellas a través del contorno meridional abierto. Para ambas masas de agua los volúmenes varían entre 2 y 4 x10⁹ m³ y los transportes entre 2 y 5 x10⁴ m³ s⁻¹, resultando en un tiempo de residencia (estimado como $t_{res} = V/Q$, donde V es el volumen de agua y Q el transporte) que varía entre 0.5 y 2.3 días,. Sin embargo esta estimación es imprecisa porque considera flujos constantes o lentamente variables, que sin embargo tienen una periodicidad típica comparable con los tiempos de residencia, y no tiene en cuenta el efecto pulsante de la marea, que hemos comprobado que es de primera importancia.

Un enfoque alternativo, más preciso aunque computacionalmente más costoso, es simular unos trazadores pasivos que sean transportados por la corriente y registrar la variabilidad de su concentración en el dominio del modelo. Un total de 44 trazadores, han sido liberados separadamente en las dos capas a intervalos de aproximadamente 4 días, y su evolución temporal ha sido analizada. La Figura 14 muestra un ejemplo de dos trazadores pasivos liberados en las dos capas, y su evolución durante unos diez días.



Fig. 10. Temporal evolution of passive tracers content in the bay (in % of their initial amount). Black (gray) line corresponds to a tracer initially released within the Atlantic (Mediterranean) layer. Tracers were released on April 18, 14:00 h.

Figura 14 - Evolución temporal del contenido de trazadores pasivos liberados en las dos capas.

Generalmente se observa como la capa Atlántica se renueva más rápidamente que la Mediterránea, aunque la primera presenta oscilaciones mucho menos armónicas que la segunda, En particular, podemos observar como al decaimiento que ocurre en la capa Atlántica en cada ciclo de marea le sigue una recuperación o remontada mucho más débil que la que presenta la capa Mediterránea. Este proceso está claramente relacionado con la facilidad con la cual el agua Atlántica puede ser aspirada fuera de la Bahía por el potente Jet Atlántico. Es de esperar que la fracción de partículas de agua Atlántica que una vez fuera de la Bahía puedan retornar a ella sea mucho menor que las de agua Mediterránea, ya que éstas no están afectadas por la intensa corriente superficial del Jet. En estos términos los tiempos de *e*-folding medio, es decir el tiempo necesario para que la concentración del trazador se reduzca de un factor *e*, son de 3.61 ± 1.39 días para la capa atlántica y 8.20 ± 2.05 días para la mediterránea.

Es interesante también analizar la variabilidad temporal de los tiempos de *e*-folding para las dos capas cuando los forzamientos externos más directamente responsables de la renovación (viento, mareas) fluctúan. La Figura 15 muestra la serie temporal de estos tiempos junto con la del stress zonal del viento (indicador del forzamiento meteorológico) y la del nivel del mar (indicador del forzamiento mareal).



Fig. 11. (a) Temporal dependence of the Atlantic (circles), Mediterranean (squares), and surface (-5 < z < 0 m; triangles) layer *e*-flushing times. The marks are located at the time of the passive tracers release. *e*-flushing times greater than 10 days were calculated by exponential extrapolation. (b) Low-pass filter τ_x time series. (c) Sea surface height at U1.

Figura 15 – Serie de tiempos de *e*-folding para las capas atlántica y mediterránea, stress zonal del viento y nivel del mar.

La correlación entre los tiempos de renovación de la capa atlántica y la modulación quincenal del nivel del mar (índice de la alternancia marea viva – marea muerta) es notable. El intercambio en la Bahía se ve amplificado en marea viva. Posiblemente, la mayor intensidad del Jet Atlántico y su correspondiente capacidad de drenar más agua superficial fuera de la Bahía, provocan una disminución notable de los tiempos de *e*-folding en la capa Atlántica. Contrariamente, la capa Mediterránea parece responder a una modulación de origen meteorológica más que a la mareal, presentando una reducción de los tiempos de *e*-folding en correspondencia de una mayor variabilidad atmosférica, y vice-versa.

Conclusiones

El grado de cumplimentación del objetivo 2 es mayor de lo previsto en la memoria. No solamente se han realizado los hindcast previstos y se ha validado el modelo con respecto a las observaciones coleccionadas en la Bahía, sino que se han realizado sendos experimentos de análisis de los tiempos de renovación con trazadores pasivos en toda el área de la Bahía. Incluso se han anticipado los primeros resultados del análisis de correlación entre estos y los condicionantes externos, como viento o marea. También se han realizado los primeros experimentos de seguimiento de partículas lagrangianas. Una animación de estos resultados preliminares puede verse en la web del proyecto (<u>http://oceano.uma.es/proyectosref.php?Id=12&i=1</u>). El objetivo 2 se considera completado en más de un 75 %.

A.2. Si ha encontrado problemas en el desarrollo del proyecto, coméntelos, especificando su naturaleza (de carácter científico, de gestión, etc).

A pesar de no haber afectado sustancialmente al resultado de los experimentos, la parada antes de tiempo de los instrumentos de medida de temperatura y salinidad utilizados durante las campañas de 2015/16, ha causado cierta reducción en la longitud de la serie a analizar. El suceso no era esperable, ya que el fabricante de los CTs Sea-Bird proporciona un software de estimación del consumo de las baterías de estos instrumentos, que fue usado en la planificación de las campañas de 2015/16, y cuyas predicciones de duración se consideraron con el debido margen. Se estima oportuno, por tanto, ampliar estos márgenes en el futuro para evitar inconvenientes de este tipo.

A.3. Indique los resultados obtenidos a partir del proyecto de excelencia llevado a cabo, según lo establecido a continuación:

RESULTADOS obtenidos a partir del proyecto de excelencia	Nº Total de resultados*
Publicaciones	3
Comunicaciones a congresos	2
Colaboraciones en empresas	-
Creación de empresas (EBT, Spin-off y Start-up)	-
Propiedad industrial (patentes, PCT, modelos utilidad,)	1
Propiedad intelectual	-
Tesis	1
Páginas web creadas	1
Nuevas líneas de investigación surgidas	-
Participación en otros Programas / Planes: (a+b+c)	
a) Plan Nacional	1
b) Programas Marco	-
c) Otros Programas	-
Colaboraciones internacionales	-
Contrataciones de personal NO con cargo al proyecto	-
Otros impactos de interés	-

B. PERSONAL EN EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE EXCELENCIA

B.1. En el caso de que el incentivo concedido incluyera una partida para la incorporación de personal con cargo al proyecto, informe sobre la/s incorporación/es realizada/s, especificando titulación, situación laboral y tareas asignadas en el proyecto así como una breve valoración cualitativa del mismo.

En el mes de Abril del 2016 se llevó a cabo la incorporación al proyecto de investigación MOCBASE del Doctor Simone Sammartino, según la disponibilidad prevista al momento de la concesión de la financiación del proyecto de dos años de contrato Post-Doctoral. El candidato es Licenciado en Ciencias Ambientales, es Doctor en Ciencias e Ingeniería del Mar por la Universidad de Nápoles (Italia) y tiene años de experiencia como investigador del grupo GOFIMA en el estudio de la dinámica oceanográfica del Estrecho y de la Bahía de Algeciras. Su experiencia se centra fundamentalmente en la oceanográfía experimental, el procesado y la visualización de datos geofísicos.

El contratado ha realizado una buena parte de las actividades previstas en los dos primeros objetivos del proyecto, en colaboración con el resto del personal adscrito al grupo de investigación. En particular ha realizado la recolección y reanálisis de los datos observacionales disponibles en la Bahía y ha sido el responsable de la planificación, preparación y ejecución de las campañas de medidas del invierno 2015. También ha colaborado con José Carlos Sánchez Garrido, miembro en plantilla del grupo GOFIMA, en la puesta a punto y ejecución del modelo de circulación que ha proporcionado la información necesaria para complementar las observaciones experimentales. Ha colaborado con el resto del personal investigador del grupo en la diseminación científica de los resultados del proyecto, liderando uno de los tres trabajos publicados en las revistas internacionales que han surgido de las labores de investigación en la Bahía. Por último ha sido el realizador de las animaciones gráficas publicadas en la web y en el canal YouTube del grupo (https://www.youtube.com/channel/UCdAjjqI9zJ Dy0Um9buigVsg).

B.2. Indique si se han producido altas y/o bajas en el equipo investigador desde el inicio del proyecto y, en su caso, si han sido ya comunicadas previamente y autorizadas por esta Secretaría General.

NO

C. PROYECTOS CON PARTICIPACIÓN DE VARIOS GRUPOS DE INVESTIGACIÓN (caso de que proceda)

C.1. Describa brevemente dicha participación y si la coordinación de los distintos grupos se ha producido de la forma prevista (en caso contrario, comente las dificultades producidas).

NO PROCEDE

D. RELACIONES O COLABORACIONES CON DIVERSOS SECTORES

D.1. En caso de subcontratación, participación o respaldo activo por parte de alguna empresa o agente socioeconómico de interés para el proyecto, indique cómo se ha realizado dicha participación: objetivos del proyecto en los que participa, importe del contrato en su caso, denominación de la empresa, nº de personas de la empresa involucradas en el proyecto, contratos laborales formalizados como consecuencia de la subcontratación de la empresa (en su caso), etc.

La realización de las campañas de medida del invierno 2015 no habría sido posible sin el respaldo y la colaboración activa de la Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras (APBA). Su apoyo ha sido fundamental tanto en las labores de planificación de las campañas, para la elección de la ubicación de los fondeos, como, y sobre todo, en la realización de las mismas. La APBA ha prestado un excelente servicio de apoyo logístico con el barco y las infraestructuras portuarias para el despliegue y recuperación de los fondeos, y ha proporcionado el material para el lastrado de los mismos.

D.2. Si el proyecto ha dado lugar a otras colaboraciones o transferencias con otras entidades, descríbalas y valórelas brevemente.

El conocimiento adquirido sobre la dinámica de la Bahía de Algeciras ha resultado útil y provechoso en las actividades del evento DIVERCIENCIA, una feria de la ciencia celebrada en Algeciras los días 15 y 16 de Abril de 2015, promovida por la Unidad de Cultura Científica y de la Innovación (UCC+i) de la UCA y FECYT. El personal del grupo GOFIMA ha montado un stand donde, gracias al uso conjunto de herramientas digitales, instrumentos de medida, maquetas e incluso un acuario con un modelo a escala del Estrecho y su intercambio de aguas, ha podido proporcionar a la población local, y especialmente a los jóvenes de los institutos de la provincia, una visión científica formal pero simplificada de la oceanografía del lugar donde viven. El grupo ha participado al evento como miembro del Campus de Excelencia del Mar (CEI·Mar) y del Observatorio Medioambiental de Estrecho (OMEG). Varios medios de prensa han hecho eco del evento: <u>http://www.campusdelmar.es/es/noticias/</u> ceimar-participa-primera-vez-stand-propio-feria-divulgativa-diverciencia-2015-algeciras, http://omeg.uma.es/newssheet.php?idnews=2&lang=esp, etc.

D.3. Si el proyecto ha dado lugar a colaboraciones con otros organismos de investigación no previstas inicialmente, coméntelas y valórelas brevemente.

La coincidencia de objetivos con el Departamento de Medio Físico de Puertos del Estado ha permitido establecer colaboraciones y planificar actividades conjuntamente con sus responsables.

D.4. Si ha iniciado la participación en proyectos del Plan Nacional, Programa Marco de I+D de la UE y/o en otros programas internacionales en temáticas relacionadas con la de este proyecto, indique programa, tipo de participación y beneficios para el proyecto.

Paralelamente a este proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía MOCBASE, el grupo ha iniciado en Enero de 2014 el proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad en el marco de la Convocatoria 2013 de ayudas a Proyectos de I+D de Excelencia del Subprograma de Generación de Conocimiento, con la denominación "Estudio numérico de la circulación 3D de la Bahía de Algeciras y de los procesos físicos y biológicos de su Entorno (ENCIBA)", código CTM2013-40886-P.

El proyecto sigue una línea de investigación paralela a la del MOCBASE, centrando su actividad investigadora en temas relacionados con la importancia de la Bahía sobre la producción primaria en la zona del Estrecho. Está previsto que los dos proyectos generen resultados complementarios y que los conocimientos adquiridos en el marco físico beneficien al marco biológico y vice-versa.

D.5. Si el proyecto ha dado lugar a contrataciones laborales, distintas a las contrataciones con cargo al proyecto, coméntelas y valórelas brevemente.

E. GASTOS REALIZADOS

Nota: Debe cumplimentarse este apartado independientemente de la justificación económica enviada por el organismo.

E.1. Indique el total de gasto realizado en el proyecto hasta este momento:

Concepto	Total gasto (€)
Personal postdoctoral	(nómina) $2.555,08 \in x \ 4 \ \text{meses} = 10.220,32 \in$ (cuota patronal) $820,18 \in x \ 3 \ \text{meses} = 2.460,54 \in$ (total) = 12.680,86 €
Personal técnico de apoyo	
Personal predoctoral	
Gastos contratación IRV	
TOTAL GASTOS PERSONAL (1)	12.680,86€
Material inventariable	1.738,30€
Material fungible	599€
Gastos complementarios	2.459,70 €
TOTAL GASTOS EJECUCIÓN (2)	4.697,00 €
TOTAL GASTOS DEL PROYECTO (=1+2)	17.377,86€

Describir brevemente el material inventariable y fungible adquirido, si procede:

Material inventariable: Servidor Dell PowerEdge T420 utilizado para el setup del modelo numérico.

Material fungible: juntas tóricas para el mantenimiento de instrumentación oceanográfica y servicio de recuperación de datos de disco duro averiado.

Describir brevemente destino, objeto y resultado de la asistencia a congresos, estancias o desplazamientos efectuados con cargo al proyecto.

Durante el proyecto se han presentado dos contribuciones por parte de dos miembros del grupo de investigación al congreso EGU General Assembly que ha tenido lugar en Viena (Austria) del 27 de Abril al 2 de Mayo de 2014. También se han cargado al proyecto dos desplazamientos a Algeciras para la realización de la campaña de Octubre 2015.

E.2 Comente brevemente si ha habido algún tipo de modificación en este apartado, indicando si ha sido comunicada previamente y autorizada por esta Secretaría General.

E.3 Observaciones

ANEXOS:

Plantillas de datos para los Resultados obtenidos a partir del Proyecto de excelencia

PUBLICACIONES

	Publicación 1
Nombre publicación:	Sánchez Garrido et al., 2014
Editorial:	Marine Pollution Bulletin
Título artículo/libro:	Meteorologically-driven circulation and flushing times of the Bay of Algeciras, Strait of Gibraltar
Autor/es:	Sánchez Garrido, J.C., J. G. Lafuente, S. Sammartino, C. Naranjo, F. J. de los Santos, and E. Álvarez Fanjul
ISBN / ISSN / Depósito legal:	doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.036

	Publicación 2
Nombre publicación:	Sammartino et al., 2014
Editorial:	Continental Shelf Research
Título artículo/libro:	A numerical model analysis of the tidal flows in the Bay of Algeciras, Strait of Gibraltar
Autor/es:	Sammartino, S., J. García Lafuente, J. C. Sánchez Garrido, F. J. De los Santos, E. Álvarez Fanjul, C. Naranjo, M. Bruno, and C. Calero
ISBN / ISSN / Depósito legal:	doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.11.002

	Publicación 3
Nombre publicación:	García Lafuente et al., 2016
Editorial:	Plos ONE
Título artículo/libro:	The mediterranean outflow in the strait of gibraltar and its connection with upstream conditions in the alboran sea
Autor/es:	Jesús García-Lafuente, Cristina Naranjo, Simone Sammartino, José C. Sánchez-Garrido, Javier Delgado
ISBN / ISSN / Depósito legal:	

	Evento 1
Nombre evento:	Encuentro de la Oceanografía Física Española 2016
Nombre ponencia/intervención:	Circulation and Water Renewal Patterns of the Bay of Algeciras: a combined observational and modeling study
Ponente:	José Carlos Sánchez Garrido
Lugar y fecha de celebración (Lugar, dd/mm/aa):	Alicante, 20 – 22 de julio de 2016

	Evento 2
Nombre evento:	41th CIESM Congress
Nombre ponencia/intervención:	Water Renewal mechanism of the Bay of Algeciras in the Strait of Gibraltar
Ponente:	José Carlos Sánchez Garrido
Lugar y fecha de celebración (Lugar, dd/mm/aa):	Kiel (Alemania), 12 – 16 de Septiembre de 2016

COLABORACIONES CON EMPRESAS

	Contrato / Convenio 1
Tipo (1):	
Categoría (2):	
Título:	
Entidades contratantes:	
Investigador responsable:	
Duración:	
Cuantía contratada (€):	
Observaciones / comentarios:	

(1) Opciones (excluyentes) posibles: Convenio / Contrato de I+D / Contrato de Apoyo Técnico / Prestación de servicios

(2) Opciones (excluyentes) posibles: Regional / Nacional / Europeo / Internacional (no Europeo)

PROPIEDAD INDUSTRIAL / INTELECTUAL

	Propiedad industrial / intelectual 1
Тіро (1):	Patente
Categoría (2):	Patente Española
N° solicitud:	201300360
Fecha solicitud (dd/mm/aa):	15/04/13
Título:	Extractor y método de extracción de cabezas de instrumentos de medidas hidrológicas
Inventores:	SAMMARTINO, Simone; GARCIA LAFUENTE, Jesús y BASCUÑANA PAREJA, Juan Antonio
Titular/es invención:	Universidad de Málaga
Codificación de la tecnología generada (3): (Códigos SIC: detallar a nivel 2)	G01N 33/18 (código CIP)
Codificación de la tecnología de destino (4): (Códigos SIC: detallar a nivel 2)	

TESIS

	Tesis 1
Título:	Drainage of deep Mediterranean Water, its transition through the Strait of Gibraltar: spatial and temporal variability
Autor:	Cristina Naranjo Rosa
Dirigida por:	Jesús García Lafuente, José Carlos Sánchez Garrido
Observaciones / comentarios:	

PÁGINAS WEBS CREADAS

	Página web 1
Nombre:	Página web del proyecto MOCBASE
Dirección web	http://oceano.uma.es/proyectosref.php?Id=12&i=1

Bibliografía

Armi, L., and D. M. Farmer (1988), The flow of Mediterranean water through the Strait of Gibraltar, *Progress in Oceanography*, 21(1), 1-103, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1016/0079-6611(88)90055-9</u>.

Bryden, H. L., and T. H. Kinder (1991), Steady two-layer exchange through the Strait of Gibraltar, *Deep Sea Research Part A*. *Oceanographic Research Papers*, *38*, *Supplement 1*(0), S445-S463, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1016/S0198-0149(12)80020-3</u>.

Bryden, H. L., J. Candela, and T. H. Kinder (1994), Exchange through the Strait of Gibraltar, *Progress in Oceanography*, 33(3), 201-248, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1016/0079-6611(94)90028-0</u>.

Buen, R. d. (1924), Avance al estudio oceanográfico de la bahía de Algeciras, Boletín de Pescas, 89, 1-35.

Candela, J., C. Winant, and A. Ruiz (1990), Tides in the Strait of Gibraltar, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C5), 7313-7335, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1029/JC095iC05p07313</u>.

Carrère, L., and F. Lyard (2003), Modeling the barotropic response of the global ocean to atmospheric wind and pressure forcing - comparisons with observations, *Geophysical Research Letters*, *30*(6), n/a-n/a, doi:10.1029/2002GL016473.

Cats, G., and L. Wolters (1996), The Hirlam project [meteorology], *IEEE Computational Science and Engineering*, 3(4), 4-7, doi:10.1109/99.556505.

Fanjul, E. Á., B. P. Gómez, and I. R. S. Arévalo (2001), Nivmar: a storm surge forecasting system for Spanish waters, *Scientia Marina*, 65(S1), 145-154, doi:<u>http://dx.doi.org/10.3989/scimar.2001.65s1145</u>.

Farmer, D. M., and L. Armi (1988), The flow of Atlantic water through the Strait of Gibraltar, *Progress in Oceanography*, 21(1), 1-103, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1016/0079-6611(88)90055-9</u>.

García Lafuente, J., J. L. Almazán, F. Castillejo, A. Khribeche, and A. Hakimi (1990), Sea level in the Strait of Gibraltar: Tides, *International Hydrographic Review*, 47, 111–130.

García Lafuente, J., J. M. Vargas, F. Plaza, T. Sarhan, J. Candela, and B. Bascheck (2000), Tide at the eastern section of the Strait of Gibraltar, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *105*(C6), 14197-14213, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1029/2000JC900007</u>.

García Lafuente, J., E. Álvarez Fanjul, J. M. Vargas, and A. W. Ratsimandresy (2002), Subinertial variability in the flow through the Strait of Gibraltar, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C10), 3168, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1029/2001JC001104</u>.

García Lafuente, J., E. Bruque Pozas, J. C. Sánchez Garrido, G. Sannino, and S. Sammartino (2013), The interface mixing layer and the tidal dynamics at the eastern part of the Strait of Gibraltar, *Journal of Marine Systems*, *117–118*(0), 31-42, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.02.014</u>.

García Lafuente, J. M., and N. C. Lucaya (1994), Tidal dynamics and associated features of the northwestern shelf of the Alboran Sea, *Continental Shelf Research*, *14*(1), 1-21, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1016/0278-4343(94)90002-7</u>.

Macías, D., M. Bruno, F. Echevarría, A. Vázquez, and C. M. García (2008), Meteorologically-induced mesoscale variability of the North-western Alboran Sea (southern Spain) and related biological patterns, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78(2), 250-266, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2007.12.008</u>.

Oddo, P., M. Adani, N. Pinardi, C. Fratianni, M. Tonani, and D. Pettenuzzo (2009), A nested Atlantic-Mediterranean Sea general circulation model for operational forecasting, *Ocean Sci.*, 5(4), 461-473, doi:10.5194/os-5-461-2009.

Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz (2002), Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE, *Computers & Geosciences*, 28(8), 929-937, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4</u>.

Sammartino, S., J. García Lafuente, J. C. Sánchez Garrido, F. J. De los Santos, E. Álvarez Fanjul, C. Naranjo, M. Bruno, and C. Calero (2014), A numerical model analysis of the tidal flows in the Bay of Algeciras, Strait of Gibraltar, *Continental Shelf Research*, 72(0), 34-46, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.11.002</u>.

Sammartino, S., J. García Lafuente, C. Naranjo, J. C. Sánchez Garrido, R. Sánchez Leal, and A. Sánchez Román (2015), Ten years of marine current measurements in Espartel Sill, Strait of Gibraltar, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *120*(9), 6309-6328, doi:10.1002/2014JC010674.

Sánchez Garrido, J. C., J. García Lafuente, E. Álvarez Fanjul, M. G. Sotillo, and F. J. de los Santos (2013), What does cause the collapse of the Western Alboran Gyre? Results of an operational ocean model, *Progress in Oceanography*, *116*(0), 142-153, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2013.07.002.

Sánchez Garrido, J. C., J. G. Lafuente, S. Sammartino, C. Naranjo, F. J. de los Santos, and E. Álvarez Fanjul (2014), Meteorologically-driven circulation and flushing times of the Bay of Algeciras, Strait of Gibraltar, *Marine Pollution Bulletin*, 80(1–2), 97-106, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.036.

Sánchez Román, A., F. Criado Aldeanueva, J. García Lafuente, and J. C. Sánchez Garrido (2008), Vertical structure of tidal currents over Espartel and Camarinal sills, Strait of Gibraltar, *Journal of Marine Systems*, 74(1–2), 120-133, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.11.007.

Sánchez Román, A., G. Sannino, J. García Lafuente, A. Carillo, and F. Criado Aldeanueva (2009), Transport estimates at the western section of the Strait of Gibraltar: A combined experimental and numerical modeling study, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C6), C06002, doi:http://dx.doi.org/10.1029/2008JC005023.

Sannino, G., A. Carillo, and V. Artale (2007), Three-layer view of transports and hydraulics in the Strait of Gibraltar: A threedimensional model study, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *112*(C3), C03010, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1029/2006JC003717</u>.

Sarhan, T., Garcı, amp, x, J. a Lafuente, M. Vargas, J. M. Vargas, and F. Plaza (2000), Upwelling mechanisms in the

northwestern Alboran Sea, Journal of Marine Systems, 23(4), 317-331, doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00068-8.

Sotillo, M. G., A. Amo-Baladrón, E. Padorno, E. Garcia-Ladona, A. Orfila, P. Rodríguez-Rubio, D. Conti, J. A. J. Madrid, F. J. de los Santos, and E. A. Fanjul (In press), How is the surface Atlantic water inflow through the Gibraltar Strait forecasted? A lagrangian validation of operational oceanographic services in the Alboran Sea and the Western Mediterranean, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, doi:<u>http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.05.020</u>.

Soto-Navarro, J., P. Lorente, E. Álvarez Fanjul, J. Carlos Sánchez-Garrido, and J. García-Lafuente (2016), Surface circulation at the Strait of Gibraltar: A combined HF radar and high resolution model study, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *121*(3), 2016-2034, doi:10.1002/2015JC011354.