

TENDENCIAS DEL VIENTO, OLAJE Y TEMPERATURA SUPERFICIAL EN EL MEDITERRÁNEO Y ATLÁNTICO PRÓXIMOS A PARTIR DE DATOS DE REANÁLISIS

José A. GUIJARRO, Justo CONDE, Joan CAMPINS,
M^a Ángeles PICORNELL y M^a Luisa ORRO
Agencia Estatal de Meteorología, España
jguijarrop@aemet.es

RESUMEN

Durante los trabajos para la elaboración de un atlas de clima marítimo se han obtenido datos de oleaje, viento y temperatura superficial del reanálisis ERA-Interim (1981-2013) para una extensa área (de 35°W a 12°E y de 0 a 52°N) de mares circundantes, con una resolución de 1°, enmarcando las zonas para las que la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) realiza predicciones de meteorología marítima. Los datos de los últimos cinco años de viento y oleaje se han comparado con los registrados por las boyas de aguas abiertas de la red de Puertos del Estado, y se ha observado una buena concordancia general. La velocidad del viento únicamente presenta tendencias significativas en unas cuantas áreas, siendo la más importante la del este de Madeira, con aumentos de más de 1,5 m/s/siglo, pero el reanálisis del NCEP muestra que con anterioridad al periodo estudiado la tendencia era negativa, por lo que podría formar parte de una oscilación de largo periodo. La altura del oleaje muestra tendencias positivas significativas en el Mediterráneo occidental y nordeste de Canarias. Las tendencias de la temperatura superficial del agua del mar son positivas en prácticamente todo el dominio estudiado, con una elevada significación estadística en extensas áreas.

Palabras clave: Tendencias, velocidad del viento, altura de las olas, temperatura superficial del agua del mar (SST), reanálisis.

ABSTRACT

Data of wave height, wind and sea surface temperature were obtained from the ERA-Interim reanalysis (1981-2013) with a resolution of 1° for a large maritime area (35°W to 12°E and 0 to 52°N) framing zones for which the State Meteorological Agency (AEMET) issues predictions of maritime meteorology. Data from the last five years of wind and wave conditions were compared with those recorded by open water buoys of Puertos del Estado, and there has been a good overall agreement. The wind speed shows significant trends only in a few areas, the most important East Madeira, with increases of more than 1.5 m/s/century, but the NCEP reanalysis shows that before the that period trend was negative, pointing at the possibility of a long-term oscillation. The wave height shows significant positive trends in the western Mediterranean and northeast of Canary islands. Trends in surface sea water temperature are positive in virtually all the studied domain, with high statistical significance in large areas.

Key words: Trends, wind speed, wave height, sea surface temperature, SST, reanalysis.

1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de la observación meteorológica convencional, realizada manualmente, correspondía a áreas terrestres, siendo comparativamente muy pocas las observaciones realizadas en superficies marítimas (a bordo de embarcaciones). Con el advenimiento de las estaciones meteorológicas automáticas la situación no ha mejorado, ya que la instalación y mantenimiento de estaciones terrestres sigue siendo mucho más costosa sobre el mar, por la dificultad de acceso y por los mayores requerimientos de resistencia a la humedad y a la corrosión salina. Y sin embargo la información climatológica de mares y océanos es de gran importancia para multitud de actividades: pesca, transporte marítimo de personas y mercancías, cruceros turísticos, navegación deportiva y recreativa, etc. Por ello los servicios meteorológicos más importantes publicaron atlas con la información de clima marítimo disponible, basada básicamente en observaciones visuales de barcos en ruta (WB, 1938; HMSO, 1949; KNMI, 1957; Crutcher, 1969; Young, 1996). Actualmente, la compilación de esta información en bases de datos globales como el COADS (*Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set*) facilita la puesta al día de este tipo de atlas (Lindau, 2001).

En España el primer atlas de climatología marina fue publicado por el Servicio Meteorológico Nacional (Zabaleta, 1976). Posteriormente el Programa de Clima Marítimo del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo ha desarrollado varios trabajos (De Luis, 1986; MOPU, 1988; Calderón *et al.*, 1988; Arribas y Serrano, 1991), así como el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX, 1997).

La puesta en operación hace ya unas décadas de modelos atmosféricos globales para la predicción del tiempo que incluyen interacciones con las aguas oceánicas han acumulado una gran cantidad de información que también puede usarse para la generación de atlas marítimos (Steurer, 1990), sobre todo con los productos de reanálisis (Sterl y Caires, 2005).

Para actualizar la información climatológica marítima disponible en AEMET y suplir al mismo tiempo la escasez de datos en zonas marítimas hemos optado también por utilizar productos de reanálisis, que se generan mediante la aplicación de los esquemas de asimilación de modernos modelos de predicción meteorológica a todos los datos históricos disponibles en un periodo determinado, que generalmente abarca 30 o más años. Como es lógico, la disponibilidad de datos ha ido variando con el tiempo, de modo que estos productos tienen una mayor fiabilidad en los años finales que en los iniciales, al haberse incrementado las observaciones disponibles por la incorporación de estaciones automáticas terrestres, boyas y observaciones realizadas desde satélites o aeronaves. Pero este inconveniente se ve compensado al proveer datos interpolados en una malla regular a intervalos fijos, que si bien presentan una densidad inferior a la de las observaciones convencionales en áreas densamente pobladas, proporcionan una excelente cobertura en áreas marítimas.

En este trabajo se estudia la variabilidad y tendencias que presentan en los productos de reanálisis tres elementos climáticos de gran importancia como son la velocidad del viento, la altura del oleaje y la temperatura superficial del agua del mar, en una extensa área del Atlántico y Mediterráneo que circundan la península Ibérica y los archipiélagos Balear y Canario.

2. METODOLOGÍA

El reanálisis elegido como fuente de datos para desarrollar este trabajo fue el ERA-Interim, del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF en sus siglas inglesas), que es un reanálisis global del estado de la atmósfera (incluyendo la componente oceánica) inicialmente pensado para el periodo comprendido desde 1989 hasta la actualidad (Dee *et al.*, 2011), aunque posteriormente se extendió diez años más hacia atrás. Los campos utilizados tienen una resolución espacial de 1° y un dominio que se extiende de 35°W a 12°E y de 0 a 52°N, abarcando así las zonas para las que la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) realiza predicciones de meteorología marítima. La resolución temporal es de 6 horas, y el periodo de estudio elegido para la climatología a desarrollar fue el treintenio 1981-2010, si bien se obtuvieron también los campos hasta 2013 a efectos de validación. Estos campos vienen en formato grib, y para permitir su análisis mediante el paquete netcdf4 de R (R Development Core Team, 2011) se convirtieron a formato netcdf con ayuda de los CDO (*Climate Data Operators*).

La comparación de los datos del reanálisis con observaciones se hizo únicamente para los últimos cinco años del periodo de estudio, ya que de estos años disponíamos de los datos horarios de las 15 boyas de aguas profundas de Puertos del Estado que aparecen en la Figura 1. (La comparación con boyas de aguas someras se desechó por estar influidas por la batimetría y la configuración de la costa). Las variables que se han comparado son la velocidad y dirección del viento a 10 m de altura, la altura significativa de las olas, y el periodo medio del oleaje, eligiendo el punto de rejilla marítimo más próximo a cada boya. En la Figura 1 se puede observar la ubicación de las boyas y los puntos de rejilla asociados a las mismas. Como la resolución temporal de los datos de las boyas es horaria, únicamente se usaron los de las 00, 06, 12 y 18 horas, en correspondencia con los del reanálisis.

Para el análisis de las tendencias primeramente se agregaron los valores hexahorarios del reanálisis en valores mensuales medios, calculando también las desviaciones típicas y los máximos mensuales. Las tendencias se calcularon por regresión con la dimensión temporal, considerando todos los valores mensuales para todo el dominio de estudio y por meses individuales en las zonas de mayor interés para estudiar sus diferencias a lo largo del año.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. 1. Comparación boyas-reanálisis

Al contrastar los datos de velocidad (media en 10 minutos) del viento y altura significativa del oleaje del reanálisis comparándolos con las observaciones de las boyas, se obtiene una buena correspondencia, como puede verse en la Tabla 1, que resume las regresiones lineales de las observaciones en función de las estimas del ERA-Interim en cada boya. (Las direcciones del viento del reanálisis también concuerdan bastante con las observaciones, pero los periodos del oleaje están claramente subestimados por el reanálisis, probablemente por un diferente método de cálculo. No se muestran las regresiones de estas dos variables por no ser objeto del presente trabajo).

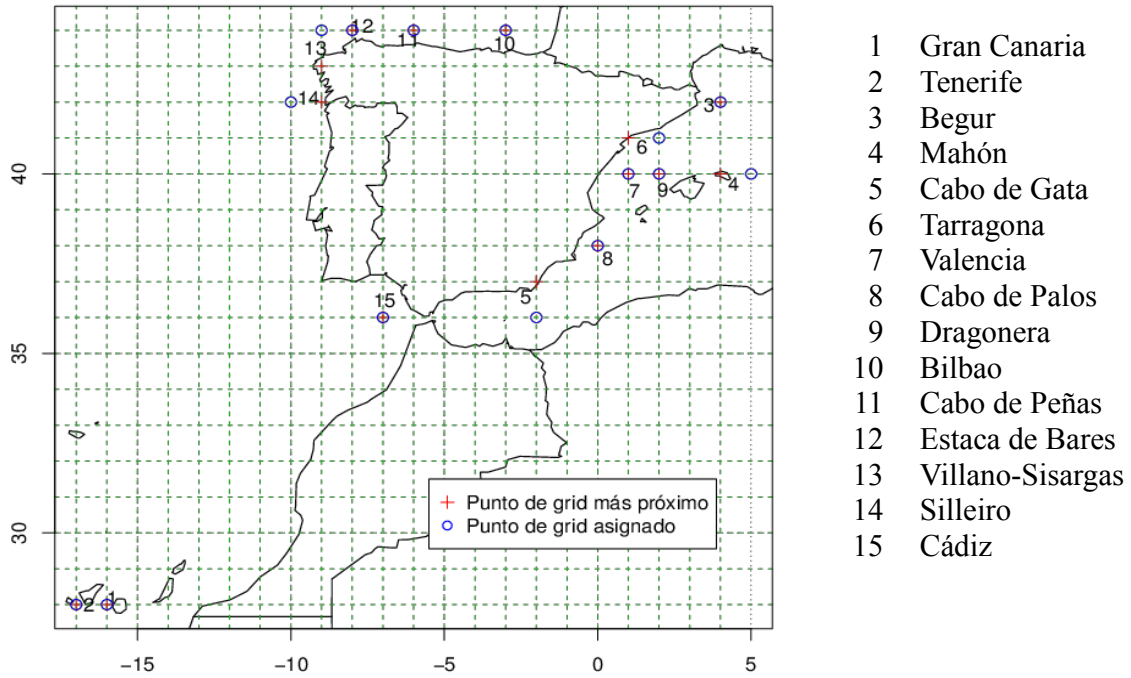


Fig. 1: Boyas de aguas profundas (las etiquetas numéricas están centradas en su ubicación real) y puntos de grid asimilados.

Boya	Velocidad del viento			Altura significativa del oleaje		
	b	r ²	RMSE (m/s)	b	r ²	RMSE (m)
1	0.754	0.574	1.606	1.037	0.727	0.304
2	0.712	0.317	2.549	0.420	0.297	0.306
3	1.021	0.726	2.332	1.012	0.831	0.423
4	0.776	0.652	1.934	0.990	0.851	0.387
5	0.782	0.584	2.208	1.003	0.839	0.288
6	0.822	0.394	2.451	1.199	0.744	0.297
7	0.669	0.383	2.320	0.791	0.622	0.310
8	0.844	0.575	1.853	1.152	0.783	0.287
9	0.758	0.524	2.032	1.311	0.800	0.365
10	0.797	0.634	1.858	1.156	0.911	0.364
11	0.744	0.582	2.071	1.020	0.893	0.365
12	0.761	0.687	1.753	1.041	0.909	0.396
13	0.833	0.720	1.850	1.005	0.907	0.391
14	0.844	0.757	1.649	1.132	0.914	0.379
15	0.771	0.537	1.954	0.764	0.665	0.390

Tabla 1: COEFICIENTES DE REGRESIÓN (b) Y DETERMINACIÓN (r²), Y ERRORES CUADRÁTICOS MEDIOS (RMSE) DE LAS COMPARACIONES ENTRE LAS OBSERVACIONES Y LAS ESTIMACIONES DE ERA-INTERIM EN LAS 15 BOYAS.

En general los coeficientes de determinación (fracción de la varianza explicada) de la altura del oleaje son elevados, con coeficientes de regresión bastante próximos a la unidad. Las excepciones las encontramos en las boyas 2 (Tenerife), 15 (Cádiz) y 7 (Valencia), donde la altura del oleaje observada es claramente menor que la del reanálisis (sobre todo en Tenerife), y en la boya 9 (Dragonera), donde sucede lo contrario. En el caso de la velocidad del viento las regresiones muestran resultados peores, casi siempre debido a una sobre-estima por parte del reanálisis (exceptuando la boya 3, Begur, única con un coeficiente de regresión superior a la unidad). En las boyas más discordantes pueden influir efectos de vecindad a la costa, como en el caso de Tenerife, y hay que tener en cuenta que una parte de estas diferencias pueden ser debidas a la distinta ubicación de las boyas y los puntos de rejilla usados para la comparación. Por otra parte, estas regresiones se han efectuado con los datos hexahorarios, mientras que para el análisis de las tendencias se usarán promedios mensuales, con una menor variabilidad, por lo que globalmente el reanálisis puede considerarse satisfactorio. A la hora de realizar climatologías de estas variables será conveniente aplicar correcciones para obtener valores insesgados respecto a las observaciones, pero para calcular las tendencias no será necesario, por lo que procederemos a usar directamente los valores proporcionados por ERA-Interim.

3. 2. Tendencias de la velocidad del viento

La Figura 2 muestra el mapa de las tendencias de la velocidad del viento durante los 33 años del periodo estudiado (1981-2013). Los valores máximos los encontramos al suroeste de la península Ibérica (E de Madeira), con valores superiores a 1,5 m/s/siglo. Otros máximos secundarios con tendencias significativas ($< 0,05$) pueden observarse junto a la costa argelina y en otras zonas más alejadas, principalmente próximas al ecuador, así como tendencias negativas en los golfos de Guinea (< 2 m/s/siglo) y de Génova (-1.5 m/s/siglo). Las velocidades medias mensuales del viento en el máximo del este de Madeira y sus tendencias se muestran en la Tabla 2, siendo únicamente significativas en los meses de junio, noviembre y, en menor medida, febrero.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medias	6.5	6.7	6.9	6.7	6.4	6.3	7.3	6.7	5.8	6.0	6.7	6.8
m/s/siglo	-1.3	2.7	0.6	2.0	2.0	3.8	2.5	1.2	1.2	1.5	3.1	2.0
Signif.	-	+	-	-	-	**	-	-	-	-	*	-

Tabla 2: MEDIAS Y TENDENCIAS MENSUALES DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN EL E. DE MADEIRA. (Significación: $0.001 < ** < 0.01 < * < 0.05 < + < 0.1 < - < 1$).

Las tendencias de las desviaciones típicas mensuales (no mostradas) presentan un máximo de 0,6 m/s/siglo en el golfo de León, y en una zona mucho más alejada (35°W, 9°N). Para esta variable disponemos también de los valores mensuales del reanálisis del NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) que, aunque con una resolución más grosera (2,5°), abarca un periodo mucho más extenso (desde enero de 1948). Ello nos permitirá tener una perspectiva temporal más amplia a la hora de valorar las tendencias encontradas. Nos vamos a concentrar en este

área de mayor significación, calculando el promedio de 4 puntos de rejilla del NCEP que cubren una superficie similar a los 12 puntos del ERA-Int utilizados anteriormente. La Figura 3 muestra la evolución temporal de las medias anuales móviles de ambos reanálisis, resultando algo mayor la velocidad del viento proporcionada por NCEP. No obstante, la evolución de ambos promedios es muy similar, como lo son sus tendencias en el periodo común (1,75 m/s/siglo en el ERA-Int y 2,09 en el NCEP) para estar calculadas con distintos puntos de rejilla. Estas tendencias, significativas ambas a un nivel $\alpha < 0,001$, corresponden al tramo ascendente común de la figura, mientras que en los 33 años anteriores la tendencia es decreciente según el reanálisis del NCEP, de modo que la tendencia global en los 66 años y tres meses de este último es prácticamente nula, al igual que su significación. Por tanto las tendencias calculadas a partir del periodo disponible del ERA-Int deben atribuirse únicamente a los últimos 33 años, pudiendo formar parte de una oscilación de periodo más largo.

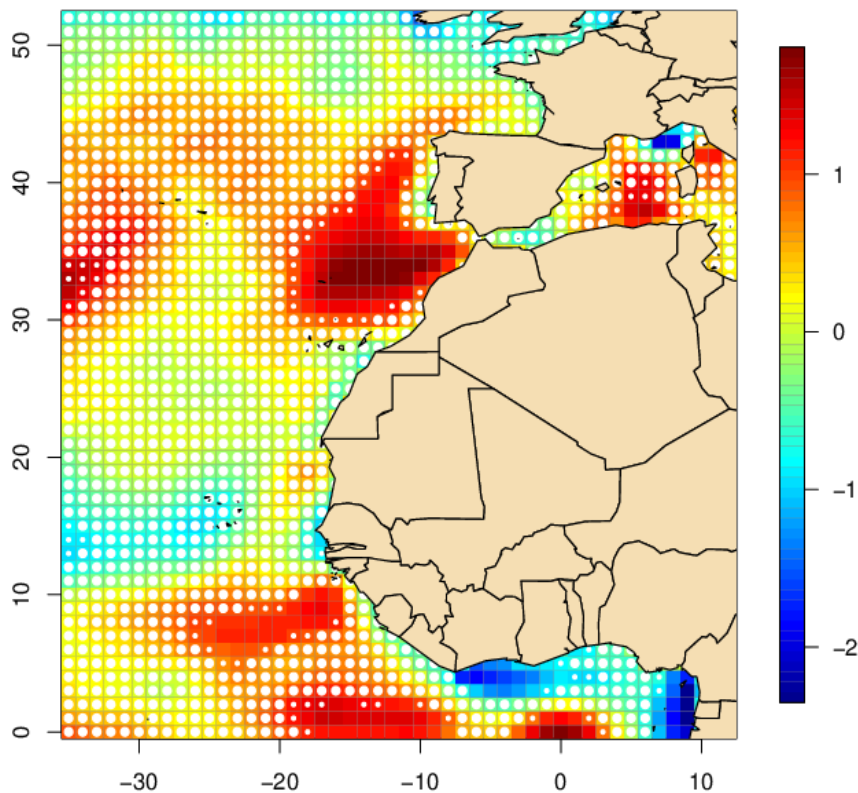


Fig. 2: Tendencias de la velocidad del viento (1981-2013) en m/s/siglo. Las áreas en las que la tendencia es poco significativa ($\alpha > 0,05$ y $\alpha > 0,10$) aparecen veladas con puntos blancos.

3. 3. Tendencias de la altura del oleaje

Las tendencias de la altura significativa del oleaje se muestran en la figura 4, donde podemos observar un máximo de más de 1 m/siglo al norte de Argelia (SE de Baleares), y otro menor, aunque significativo, frente a las costas atlánticas de Marruecos (NE de Canarias). En la Tabla 3 se presentan los valores medios mensuales y sus tendencias en estas dos áreas con mayor significación, SE de Baleares y NE de Canarias. En la primera de ellas las tendencias son significativas en los meses de mayo, septiembre, noviembre, febrero, junio, agosto y, algo

menos, en julio y octubre (8 meses del año), mientras que en la segunda únicamente son significativas las de julio, junio y, en menor medida, noviembre. La variabilidad de los valores mensuales (no mostrada) tiende a aumentar, pero únicamente es significativa al SE de Baleares (0,2 m/siglo de aumento de la desviación típica) y en la zona ecuatorial (0,1

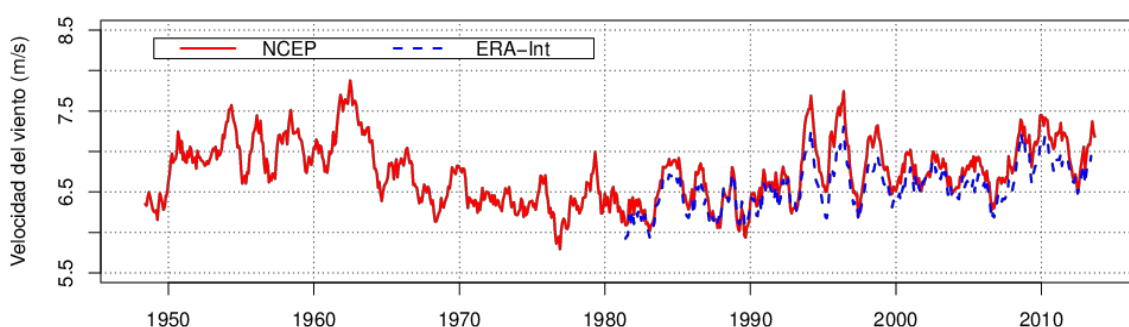


Fig. 3: Medias anuales móviles de las velocidades mensuales del viento obtenidas de los reanálisis del NCEP y del ERA-Interim, promediadas en la zona este de Madeira.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<i>SE de Baleares</i>												
Medias	1.5	1.5	1.3	1.2	0.9	0.8	0.7	0.7	0.9	1.1	1.5	1.6
m/siglo	0.2	1.5	0.6	0.3	0.8	0.5	0.6	0.6	1.0	0.7	1.2	0.7
Signif.	-	*	-	-	**	*	+	*	**	+	**	-
<i>NE de Canarias</i>												
Medias	2.5	2.4	2.3	2.2	1.8	1.7	1.8	1.7	1.7	1.9	2.2	2.4
m/siglo	0.3	0.4	-0.2	0.5	0.5	0.9	1.0	0.4	0.3	0.3	1.2	0.3
Signif.	-	-	-	-	-	*	**	-	-	-	+	-

Tabla 3: MEDIAS Y TENDENCIAS MENSUALES DE LA ALTURA DEL OLEAJE AL SUDESTE DE BALEARES Y NORDESTE DE CANARIAS. (Significación: 0.001 < ** < 0.01 < * < 0.05 < + < 0.1 < - < 1).

3. 4. Tendencias de la temperatura superficial

La temperatura superficial del agua del mar muestra tendencias máximas que superan los 3 °C/siglo (Figura 5) en pequeñas zonas distribuidas por la costa occidental africana, golfo de Cádiz, golfo de Vizcaya y Mediterráneo occidental (aunque en este último la significación ronda únicamente el nivel $\alpha=0,10$). Pero en extensas áreas del Atlántico se superan los 2 °C/siglo con una elevada significación ($\alpha < 0,05$). La Tabla 4 muestra los valores medios mensuales de la temperatura superficial y sus tendencias en el golfo de Vizcaya y al sur de Canarias. Se observa una alta significación en casi todos los meses, pues únicamente dejan de ser significativas las tendencias de febrero y marzo en el golfo de Vizcaya. La máxima significación se alcanza en ambas zonas en el mes de octubre ($\alpha < 0,001$).

Los máximos aumentos de la variabilidad (no mostrada) se dan en la mitad NE del Mediterráneo occidental, mar de Alborán, costa norte de Portugal, y costa noroccidental de África, con tendencias de la desviación típica de más de 0,8 °C/siglo.

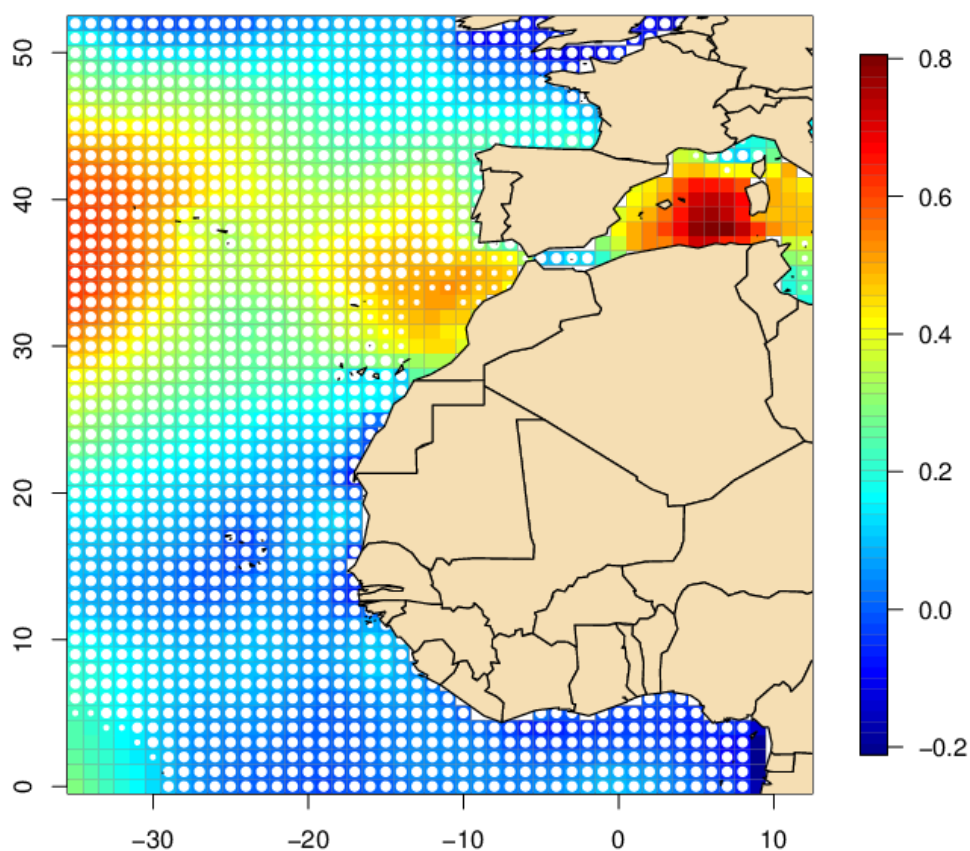


Fig. 4: Tendencias de la altura del oleaje (1981-2013) en m/siglo.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<i>Golfo de Vizcaya</i>												
Medias	12.6	12.1	12.1	12.8	14.7	17.5	19.8	20.9	19.8	17.7	15.4	13.5
°C/siglo	1.9	1.3	0.9	2.4	4.0	3.8	2.8	3.5	3.6	5.8	3.5	2.3
Signif.	*	-	-	**	**	**	+	**	*	***	**	**
<i>Sur de Canarias</i>												
Medias	20.4	19.8	19.7	20.1	20.8	21.9	22.7	23.5	24.1	24.0	22.9	21.5
°C/siglo	2.9	2.2	2.0	2.4	2.4	2.0	1.7	2.2	2.2	3.3	2.9	2.5
Signif.	**	*	*	**	**	*	*	*	*	***	**	**

Tabla 4: MEDIAS Y TENDENCIAS MENSUALES DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL EN EL G. DE VIZCAYA Y SUR DE CANARIAS.

(Significación: $0 < *** < 0.001 < ** < 0.01 < * < 0.05 < + < 0.1 < - < 1$).

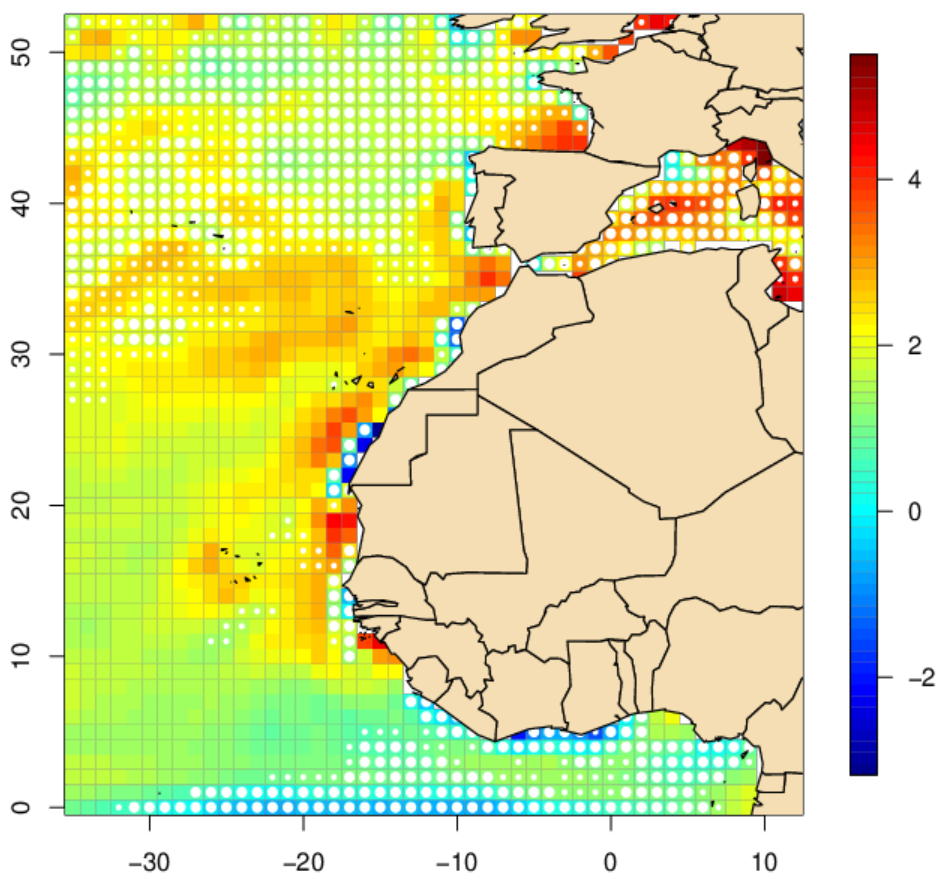


Fig. 5: Tendencias de la temperatura superficial (1981-2013) en °C/siglo.

4. CONCLUSIONES

Las comparaciones de los datos obtenidos del reanálisis ERA-Interim con las observaciones de las boyas de aguas profundas son bastante satisfactorias, ofreciendo una buena cobertura espacio-temporal en las áreas marítimas. La velocidad del viento únicamente presenta tendencias significativas en unas cuantas áreas, siendo la más importante la del este de Madeira, con aumentos de más de 1,5 m/s/siglo. La altura significativa de las olas también presenta tendencias positivas, aunque su significación estadística se reduce al Mediterráneo occidental (> 1 m/siglo) y nordeste de Canarias. Las tendencias de la temperatura superficial del agua del mar son positivas en prácticamente todo el dominio estudiado, con elevada significación estadística en extensas áreas, y se llegan a superar aumentos de 3 °C/siglo en el Mediterráneo, golfo de Vizcaya y varias zonas de la costa occidental africana.

Al comparar la evolución de la velocidad media del viento obtenida del ERA-Interim con la del reanálisis del NCEP para la zona este de Madeira, se observa una buena correlación, mostrando ambos un ascenso en el tramo común de datos (desde 1981). Sin embargo en el

periodo 1948-1980 el reanálisis del NCEP muestra una tendencia descendente de similar magnitud al ascenso posterior, por lo que las tendencias de viento y oleaje obtenidas en este trabajo podrían formar parte de una oscilación de largo periodo.

5. BIBLIOGRAFÍA

Arribas Perea, M.Á., Serrano Hidalgo, O. (1991). *Atlas de análisis extremal sobre datos visuales de barcos en ruta*. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Dirección General de Puertos y Costas, Madrid, 135 pp.

Calderón Álvarez, J., Maron Loureiro, A., Conde Aldemira, J.J. (1988). Atlas basado sobre observaciones visuales de barcos en ruta. Nivel I, Condiciones medias para el año medio y estaciones medias. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid, 337 pp.

C.E.D.E.X. (1997). *Atlas de clima marítimo con los datos del retroanálisis WASA*. Centro de Estudios de Puertos y Costas, Puertos del Estado, Madrid, 244 pp.

Crutcher, H.L. (1969). U.S. Navy Marine climatic atlas of the world. Volume VIII, The world. U.S. Dept. of Commerce, National Climatic Center, Washington D.C., USA, 179 pp.

H.M.S.O. (1949). Monthly sea surface temperatures of North Atlantic Ocean. His Majesty's Stationery Office, London, 7 pp.

Dee, D.P. and Coauthors (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553–597. doi: 10.1002/qj.828.

K.N.M.I. (1957). The mediterranean oceanographic and meteorological data. S-Gravenhage, Staatsdrukkerij, Holanda, 19 pp.

Kalnay, E. and Coauthors (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, pp. 437-470.

Lindau, R. (2001). Climate atlas of the Atlantic Ocean: derived from the comprehensive ocean atmosphere data set (COADS). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 514 pp.

Luis Guillén, J.E. de (1986). Ejecución del hindcasting piloto y desarrollo del atlas de oleaje. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.

M.O.P.U. (1988). *Atlas basado sobre observaciones visuales de barcos en ruta*. Dir. Gen. de Puertos y Costas, Programa del Clima Marítimo. Publ. n° 28, Madrid, 337 pp.

R Development Core Team (2011). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>

Sterl, A., Caires, S. (2005). "Climatology, variability and extrema of ocean waves: The web-based KNMI/ERA-40 wave atlas". *Int. J. Climatol.*, 25, pp. 963-977.

Steurer, P.M. (1990). U.S. Navy hindcast spectral ocean wave model climatic atlas: Mediterranean sea. Naval Oceanography Command Detachment, Asheville, NC, USA, 309 pp.

Weather Bureau (1938). Atlas of climatic charts of the oceans. Weather Bureau, Washington, USA, 63 pp.

Young, I.R. (1996). Atlas of the oceans : wind and wave climate. Pergamon, Oxford, 241 pp., ISBN: 0-08-042519-4.

Zabaleta Vidales, C. (1976). Atlas de climatología marina. Servicio Meteorológico Nacional, Madrid, 100 pp., ISBN: 84-500-1991-5.