

CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA PRESENTE Y FUTURO DE LAS AGUAS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA Y EL MAR MEDITERRÁNEO

Roland AZNAR LECOCQ¹, Juan Carlos SÁNCHEZ PERRINO², José María RODRÍGUEZ GONZÁLEZ², David RAMOS COLLADA², Ernesto RODRÍGUEZ CAMINO², Gabriel JORDÀ³, Marta MARCOS³,

Damià GOMIS³, Samuel SOMOT⁴, Enrique ÁLVAREZ FANJUL¹

¹Área de Medio Físico, Puertos del Estado

²Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

³Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA)

⁴Centre National de Recherches Scientifiques, Météo-France

raznar@puertos.es, jsanchezp@aemet.es, jrodriguezg@aemet.es, dramosc@aemet.es,
erodriguezc@aemet.es, gabriel.jorda@uib.es, marta.marcos@uib.es, damia.gomis@uib.es,
samuel.somot@meteo.fr, enrique@puertos.es

RESUMEN

La colaboración establecida entre AEMET, Puertos del Estado, IMEDEA y Météo-France tiene como objetivo realizar simulaciones de océano para obtener escenarios de cambio climático marino (oleaje, residuos del nivel del mar y circulación oceánica), que cubran las zonas marítimas que circundan la Península Ibérica y el mar Mediterráneo.

Las simulaciones de circulación oceánica se han realizado con una versión del modelo baroclínico regional NEMOMED12 a 1/12° de resolución, adaptada al área geográfica mencionada. Inicialmente, se ha verificado el modelo de océano mediante simulaciones de reanálisis, forzándolo con flujos atmosféricos procedentes de *downscaling* dinámicos de ERA-interim (1989-2004) y ERA40 (1960-2000), y comparando los resultados con datos observados. Posteriormente, se ha alimentado el modelo con forzamientos atmosféricos regionalizados correspondientes al escenario de cambio climático A1B (2000-2050) de los modelos globales HADCM3 y ECHAM5, para llevar a cabo las simulaciones de clima futuro.

Palabras clave: océano, clima, modelización, Mediterráneo, Península Ibérica.

ABSTRACT

The aim of the collaboration established between the Spanish Metoffice (AEMET), Puertos del Estado, IMEDEA and Météo-France is to perform ocean simulations to obtain marine climate change scenarios (waves, sea level and ocean circulation) which covers the sea areas surrounding the Iberian Peninsula and the Mediterranean Sea.

The ocean circulation simulations have been carried out by using the regional baroclinic model NEMOMED12 at 1/12° of resolution, adapted to the above-mentioned geographical domain. Initially, the ocean model has been verified by means of reanalysis simulations, forcing it with atmospheric fluxes derived from dynamical downscalings of ERA-interim (1989-2004) and ERA-40 (1960-2000), and comparing the results with observational data. Subsequently, the model has been forced with downscaled atmospheric fluxes corresponding to the A1B climate change scenario (2000-2050)

obtained from the HADCM3 and ECHAM5 global models, in order to perform the future climate simulations.

Key words: ocean, climate, modelling, Mediterranean, Iberian Peninsula.

1. INTRODUCCIÓN

La obtención de reanálisis y proyecciones futuras de temperatura, salinidad y corrientes de las zonas marítimas que rodean la Península Ibérica es uno de los objetivos marcados por el convenio firmado entre Puertos del Estado y la Agencia Estatal de Meteorología, en colaboración con IMEDEA y Météo-France. Las simulaciones se llevan a cabo con un modelo baroclínico de circulación, forzado con condiciones de contorno correspondientes al clima atmosférico presente y a estimaciones de clima atmosférico futuro.

Para reproducir el clima de las últimas décadas del siglo XX se han generado dos reanálisis regionalizados o *hindcasts* que cubren los periodos 1989-2004 y 1960-2000. Los resultados obtenidos se han comparado con valores observados para evaluar el grado de fiabilidad del modelo y de los flujos atmosféricos usados como forzamiento. Las proyecciones de futuro corresponden al escenario de cambio climático SRES-A1B y abarcan del año 2000 a 2050.

2. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Se ha empleado el modelo de océano NEMO en la versión adaptada al mar Mediterráneo NEMOMED12 (Lebeaupin et al., 2011). La malla de NEMOMED12 es de tipo Arakawa C de $1/12^\circ$ de resolución horizontal y 50 niveles verticales y concentra 30 de ellos en los primeros 400 metros. El dominio cubra la región comprendida entre las longitudes 21°W y $38,25^\circ\text{E}$ y las latitudes $23,1^\circ\text{N}$ y $49,5^\circ\text{N}$, y abarca las zonas costeras de la Península Ibérica, las Islas Canarias y la totalidad del mar Mediterráneo (figura 1). El dominio está cerrado en el contorno atlántico, de manera que se imponen corrientes nulas en esos puntos.

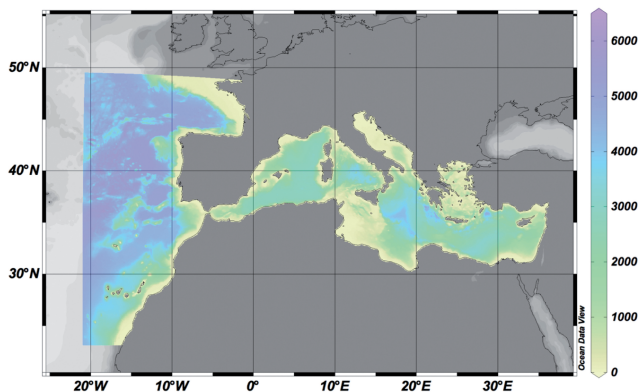


FIG. 1: Dominio geográfico de la configuración IBMED12.

Los campos atmosféricos usados como forzamiento del modelo de océano son generados mediante un proceso de bajada de escala o *downscaling* dinámico de distintas fuentes de datos, realizado con el

modelo atmosférico regional RCA3.5 (Samuelsson et al., 2011). En concreto, los flujos atmosféricos empleados para los *hindcasts* provienen de los reanálisis ERA40 (1960-2000) y ERA-interim (1989-2004) del Centro Europeo para la Predicción del Tiempo a Plazo Medio (CEPPM, ECMWF en inglés). En el caso de las proyecciones de clima futuro, los datos corresponden al escenario de cambio climático SRES-A1B, según el cual se estima un rápido aumento de las emisiones globales de gases de efecto invernadero en la primera mitad del siglo XXI para llegar a un máximo alrededor de 2050 y disminuir posteriormente. Para este escenario, se bajan de escala los datos generados por dos modelos globales: HadCM3 (Johns et al., 2003) y ECHAM5 (Roekner et al., 2006).

Las condiciones iniciales y de contorno de temperatura y salinidad del océano aplicadas en las distintas simulaciones son el resultado de una combinación de los datos climatológicos Levitus94 (Levitus et al., 2000) en el Atlántico y MEDAR-MedatlasII (Rixen et al., 2005) en el Mediterráneo. En el caso de las proyecciones de futuro, las condiciones de contorno se obtienen modificando estas climatologías con anomalías de los perfiles verticales estimadas por los modelos HadCM3 y ECHAM5. Los datos de esorrentía de los principales ríos (entre ellos se incluye el aporte del mar Negro al Egeo) provienen de la climatología mensual RivDis de la UNESCO.

Analizando los flujos de calor procedentes de los distintos *downscaling* atmosféricos, promediados temporal y espacialmente sobre el mar Mediterráneo, se aprecian sesgos en los flujos de calor (sensible, latente, onda larga y onda corta) con respecto a valores observados. La consecuencia más destacable es que los flujos de calor neto resultantes en la superficie del Mediterráneo son claramente positivos (+32 W/m² en el caso del *downscaling* de ERA-40). Estos resultados contrastan notablemente con los valores estimados a partir de observaciones, según los cuales el flujo de calor neto ha de ser negativo y oscilar en torno a -5 W/m², valor inferido a partir de mediciones de transporte en el estrecho de Gibraltar (Béthoux, 1979, Sánchez-Gómez et al., 2011): en promedio la superficie del mar Mediterráneo pierde calor en superficie, pérdida que se contrarresta con un aporte de calor neto a través del estrecho de Gibraltar. De este modo, si se aplicaran los mencionados valores de los *downscaling* atmosféricos al modelo de circulación, se incrementaría el contenido de calor en el Mediterráneo y, por consiguiente, la temperatura del mismo. El flujo de agua dulce atmosférico, definido como la diferencia entre evaporación y precipitación, presenta también diferencias en el mar Mediterráneo cuando se compara con valores medidos. En este caso, el balance obtenido es menor que en las observaciones, lo que repercute en una menor salinidad debido a un mayor aporte neto de agua. Por tanto, para neutralizar los sesgos existentes en los flujos de calor y agua dulce que pueden traducirse en derivas no realistas de la temperatura y salinidad y desembocar en una inestabilización del sistema, se aplican correcciones a dichos flujos superficiales antes de introducirlos en el modelo de océano baroclínico.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Validación de simulaciones de retroanálisis regionalizadas ERA-interim y ERA-40

Las simulaciones de reanálisis muestran distribuciones espaciales de la temperatura y salinidad superficiales promediadas temporalmente conforme a los patrones conocidos. En el caso de la temperatura estimada por los *hindcasts* de ERA-interim y ERA-40, los valores se van incrementando a medida que nos desplazamos hacia el sur y este del dominio (figura 2). El gradiente norte-sur de temperatura es más evidente en la zona atlántica, donde destacan las zonas de afloramiento de aguas profundas más frías a lo largo de las costas gallega, portuguesa y marroquí. En ambos *hindcasts*, la temperatura superficial del mar es inferior a las observaciones de satélite AVHRR, con sesgos en torno a 2°C en el sureste del

Mediterráneo, aunque se reproduce correctamente la variabilidad como refleja el *hindcast* de ERA-interim en los puntos de fondeo de las boyas gallegas de Cabo Villano y Cabo Silleiro (figura 3).

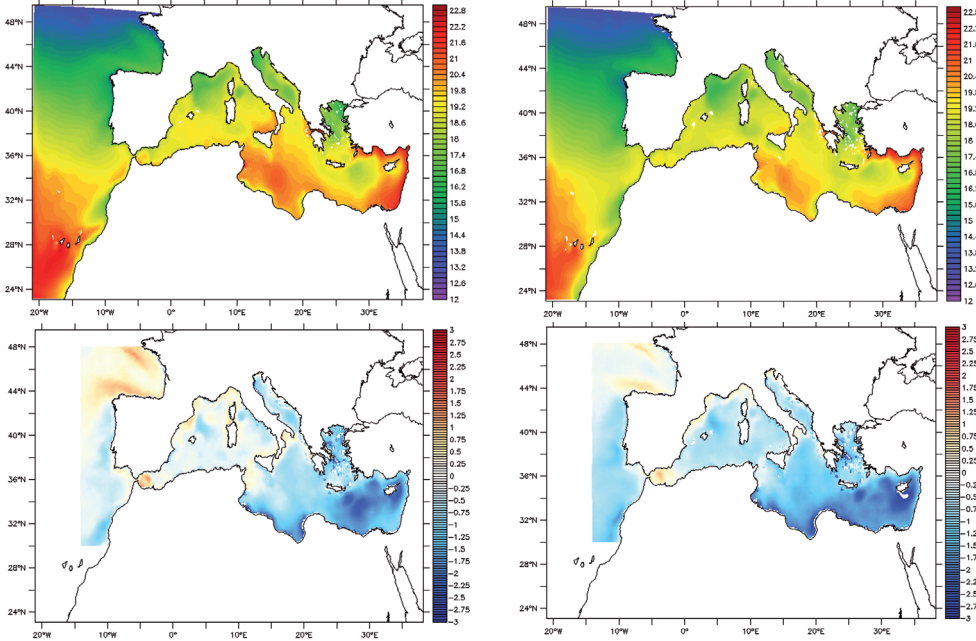


FIG. 2: Temperatura superficial media del agua (°C) (arriba) y sesgo respecto a las observaciones de satélite AVHRR (abajo) para los hindcasts de ERA-interim (1990-2004) (izquierda) y ERA-40 (1961-2000) (derecha).

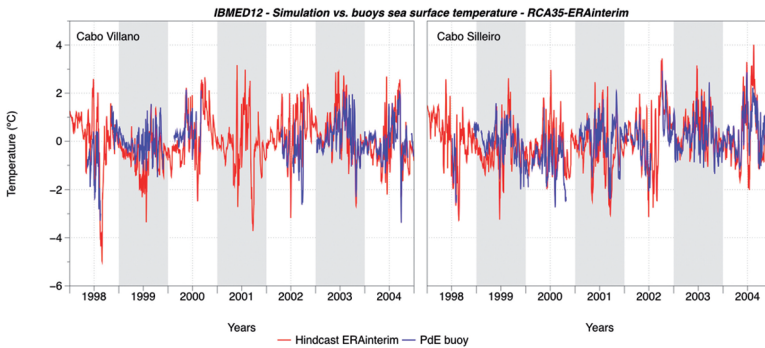


FIG. 3: Anomalías de temperatura superficial del mar obtenidas del hindcast de ERA-interim (1998-2004) (rojo) y las boyas (azul) de Cabo Villano (izquierda) y Cabo Silleiro (derecha).

En cuanto a la salinidad superficial media, el patrón presenta valores más altos en el mar Mediterráneo, localizándose los máximos en su parte suroriental (figura 4). En el océano Atlántico el gradiente se orienta de norte a sur. El sesgo respecto a la climatología Levitus94 (Levitus et al., 2000) se evidencia fundamentalmente en la desembocadura de los principales ríos de la zona de estudio (Loira, Ebro, Ródano, Po, Nilo) y, sobre todo, en el mar Egeo, debido a los penachos de agua dulce asociados a los ríos y a la descarga del mar Negro.

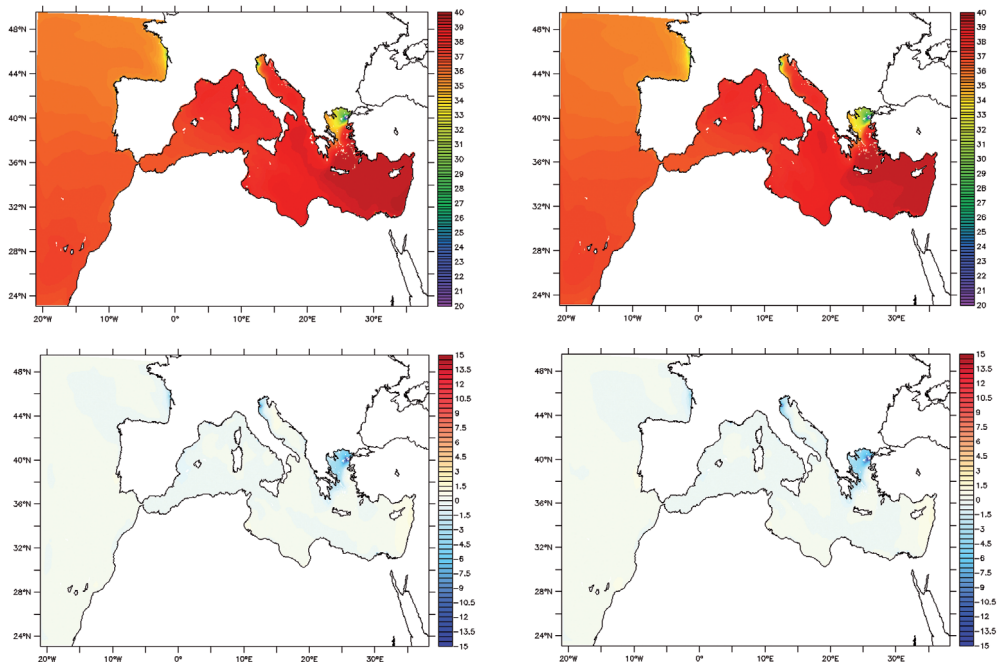


FIG. 4: Salinidad superficial media del agua (psu) (arriba) y sesgo respecto a la climatología Levitus94 (abajo) para los hindcasts de ERA-interim (1990-2004) (izquierda) y ERA-40 (1961-2000) (derecha).

Tal y como muestra la figura 5, los dos *hindcasts* subestiman la temperatura en la capa superficial de 0 a 150 metros, si se compara con los datos de la climatología EN3 (Ingleby y Huddleston, 2005). Por el contrario, en capas más profundas el resultado es el inverso y se sobrestiman los datos climatológicos, siendo este sesgo positivo más evidente en la capa intermedia hasta unos 800 metros (Tabla 1).

En ambos reanálisis regionalizados, la salinidad presenta características similares a la temperatura, con valores inferiores a la climatología de referencia entre 0 y 150 metros (figura 6). Los resultados son en cambio superiores a la climatología en el resto de la columna de agua, especialmente en la capa intermedia entre 200 y 800 metros, reduciéndose ese sesgo positivo en las capas más profundas, particularmente en el caso de ERA-40 (Tabla 1).

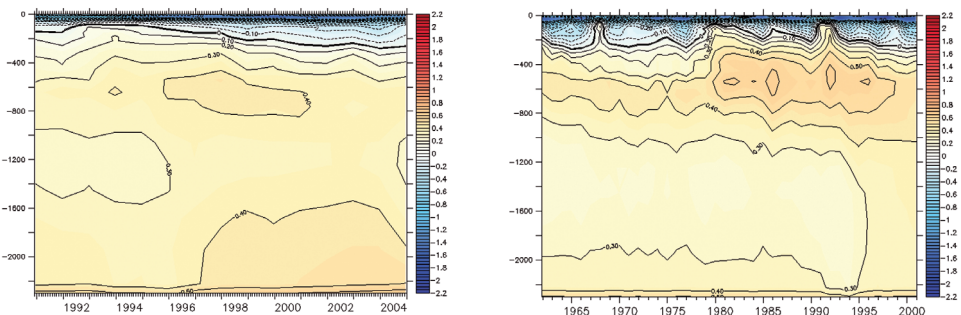


FIG. 5: Evolución temporal de la diferencia entre perfiles verticales medios de temperatura (°C) en el mar Mediterráneo de los hindcasts de ERA-interim (1991-2004) (izquierda) y ERA-40 (1961-2000) (derecha), respecto a la climatología EN3. Se muestran los resultados hasta 2300 metros.

Temperatura (°C)

	ERA-interim (1990-2004)	Sesgo	ERA-40 (1961-2000)	Sesgo
Superficie	19,38	-0,49	19,08	-0,58
0-150 m	15,89	-0,47	15,70	-0,52
150-600 m	14,14	+0,26	14,26	+0,34
600-2300 m	13,41	+0,36	13,34	+0,31

Salinidad (psu)

	ERA-interim (1990-2004)	Sesgo	ERA-40 (1961-2000)	Sesgo
Superficie	37,96	-0,19	37,89	-0,26
0-150 m	38,25	-0,15	38,20	-0,19
150-600 m	38,76	+0,03	38,77	+0,06
600-2300 m	38,67	+0,05	38,64	+0,03

TABLA 1: Valores promediados en el Mar Mediterráneo de la temperatura potencial y la salinidad de los Hindcasts de Era-Interim (1990-2004) y ERA-40 (1961-2000), y sesgos respecto a las climatologías AVHRR (Marullo et al., 2007) para la temperatura superficial y EN3 (Ingleby y Huddleston, 2005) para la temperatura y salinidad por capas.

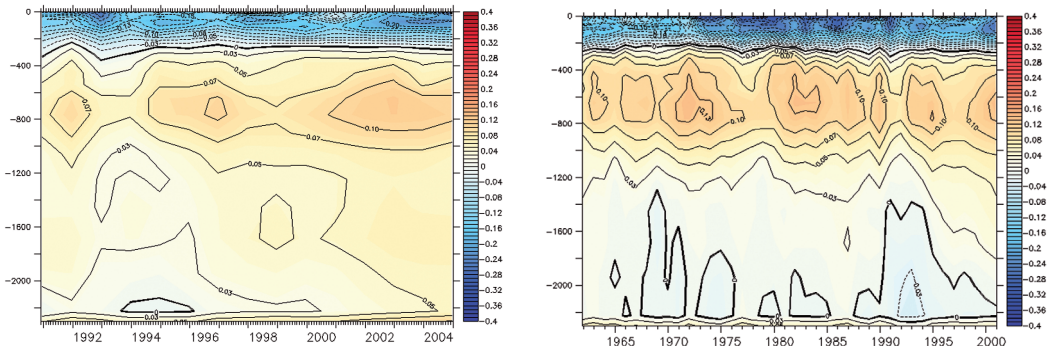


FIG. 6: Evolución temporal de la diferencia entre perfiles verticales medios de salinidad (psu) en el mar Mediterráneo de los hindcasts de ERA-interim (1991-2004) (izquierda) y ERA-40 (1961-2000) (derecha), respecto a la climatología EN3. Se muestran los resultados hasta 2300 metros de profundidad.

Los hindcasts reproducen un transporte de agua neto a través del estrecho de Gibraltar algo superiores a las últimas estimaciones existentes en la literatura ($+0,038 \pm 0,007$ Sv, según Soto-Navarro et al., 2010), en especial en el caso de ERA-interim. Este aporte de agua equilibra la pérdida de agua por evaporación que tiene lugar en la superficie del Mediterráneo (tabla 2). El transporte de calor neto arroja promedios próximos al rango medido en Gibraltar de 5,3 a 6,2 W/m² (MacDonald et al., 1994). En los dos reanálisis, el calor entrante compensa en gran parte el calor perdido en la superficie del Mediterráneo, reproduciéndose por tanto de forma realista el equilibrio térmico.

	ERA-interim		ERA-40	
Transporte neto agua Gibraltar (Sv ; mm/día)	+0,057 ± 0,005	+1,93 ± 0,17	+0,050 ± 0,005	+1,72± 0,17
Pérdida agua superficie Mediterráneo (mm/día)	+1,89		+1,65	
Transporte neto calor Gibraltar (W/m ²)	+5,1		+4,4	
Pérdida calor superficie Mediterráneo (W/m ²)	-4,8		-4,5	

TABLA 2: Valores promediados de los transportes netos de agua y calor en el estrecho de Gibraltar y flujo de calor perdido en la superficie del Mediterráneo, para Era-Interim (1990-2004) y ERA-40 (1961-2000).

3.2. Simulación de escenario de cambio climático A1B

Los resultados preliminares de la simulación de océano, forzada con flujos atmosféricos correspondientes al *downscaling* del escenario de cambio climático A1B del modelo HadCM3, muestran un incremento de la temperatura media entre 2015 y 2025, respecto al periodo 1961-1990, en prácticamente todo el dominio geográfico estudiado (figura 7). Los aumentos más significativos se concentran en el océano Atlántico frente a la Península Ibérica y en el Mediterráneo central, con valores superiores a 1°C. El ascenso de la temperatura en la mencionada zona atlántica al oeste de la Península Ibérica aparece reflejado en profundidad, con aumentos en la capa superficial hasta los 200 metros superiores a 0,7 °C en 2025 (figura 7).

A diferencia de la temperatura, la salinidad tiende a disminuir a inicios del siglo XXI, de forma más marcada en superficie en la zona del mar Cantábrico y golfo de Vizcaya (figura 7), con la salvedad del norte del mar Adriático y mar Egeo donde aumenta debido posiblemente a una menor aporte de agua dulce del río Po y mar Negro, respectivamente.

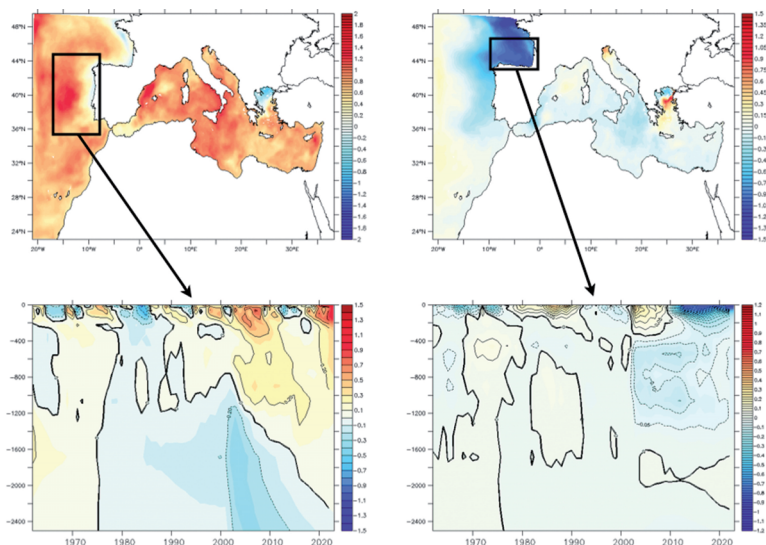


FIG. 7: Diferencias de la temperatura superficial media del agua (°C) (arriba, izquierda) y la salinidad (psu) (arriba, derecha) entre los periodos 2015-2025 y 1961-1990, para el escenario A1B de HadCM3. Evolución temporal de las anomalías del perfil vertical medio de temperatura en las aguas atlánticas de la Península Ibérica (abajo, izquierda) y salinidad en el mar Cantábrico (abajo, derecha) del escenario A1B de HadCM3, respecto al periodo 1961-1990. Se muestran los resultados hasta 2500 metros de profundidad.

4. CONCLUSIONES

La colaboración entre Puertos del Estado, AEMET, IMEDEA y Météo-France ha permitido la realización de reanálisis y proyecciones del escenario de cambio climático A1B de la circulación marina en el Mediterráneo, zonas atlánticas de la Península Ibérica e Islas Canarias.

Los reanálisis llevados a cabo con forzamientos atmosféricos obtenidos de un *downscaling* dinámico de ERA-interim y ERA-40 reproducen los principales patrones climáticos de temperatura y salinidad de la zona de estudio, a pesar de subestimar los valores en las capas superficiales de la columna de agua y sobrestimarlos en capas más profundas. Asimismo, los equilibrios térmico y de agua dulce de la segunda mitad del siglo XX en el mar Mediterráneo son simulados correctamente.

Con respecto a las proyecciones de futuro, los primeros resultados obtenidos bajo la hipótesis de escenario de cambio climático SRES-A1B del modelo global HadCM3 señalan un aumento de la temperatura del mar en la segunda década del siglo XXI respecto al periodo 1961-1990. Este incremento se evidencia tanto en superficie como en capas más profundas de prácticamente todo el Mediterráneo y de la zona atlántica lindante con la Península Ibérica y Canarias, fenómeno que, en cambio, no se ve reflejado en la salinidad de la zona de estudio.

Actualmente se está llevando a cabo un análisis más pormenorizado de los resultados obtenidos en las distintas simulaciones. Las variables más destacables derivadas de estas simulaciones se almacenarán en una base de datos climáticos de alta resolución que permitirá ofrecer productos útiles para llevar a cabo estudios de índole más específica.

REFERENCIAS

- Béthoux J.P. (1979) "Budgets of the Mediterranean Sea - Their dependance on the local climate and on the characteristics of the Atlantic Waters" *Oceanologica Acta*.
- Ingleby B., Huddleston M. (2007). "Quality control of ocean temperature and salinity profiles—Historical and real-time data". *Journal of Marine Systems*. Vol. 65, pp 158–175.
- Johns T., Gregory J., Ingram W., Johnson C., Jones A., Lowe J., et al. (2003), "Anthropogenic climate change for 1860 to 2100 simulated with the HadCM3 model under updated emissions scenarios", *Climate Dynamics*. Vol. 20, pp. 583–612.
- Lebeaupin Brossier C., Béranger K., Deltel C., Drobinski P. (2011). "The Mediterranean response to different space-time resolution atmospheric forcings using perpetual mode sensitivity simulations". *Ocean Modelling*. Vol. 36, pp 1–25.
- Levitus S., Antonov J., Boyer T. (2000), "Warming of the World Ocean", *Science*.
- MacDonald A, Candela J, Bryden H. (1994). "An estimate of the net heat transport through the Strait of Gibraltar". Seasonal and interannual variability of the Western Mediterranean Sea, Coastal Estuarine Studies, 46, *American Geophysics Union* pp. 13–32.
- Marullo S., Buongiorno Nardelli B., Guarracino M., Santoleri R. (2007). "Observing the Mediterranean Sea from space: 21 years of Pathfinder-AVHRR sea surface temperatures (1985 to 2005): re-analysis and validation". *Ocean Science*. Vol.3, pp 299-310.
- Rixen M., Beckers J., Levitus S., Antonov JI., Boyer T., Maillard C., et al. (2005). "The Western Mediterranean Deep Water: a proxy for climate change". *Geophys. Research Letters*. 32 L12608.
- Roeckner E., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kornbluh L., et al. (2006) "Sensitivity of Simulated Climate to Horizontal and Vertical Resolution in the ECHAM5 Atmosphere Model", *Journal of Climate*. Vol. 19, pp 3771–3791.
- Samuelsson P., Jones C., Willén U., Ullerstig A., Gollvik S., Hansson U., et al. (2011). "The Rossby Centre Regional Climate model RCA3: model description and performance" *Tellus A*. (2011).

- Sánchez-Gómez E., Somot S., Josey S.A., Dubois C., Elguindi N., Déqué M. (2011) "Evaluation of Mediterranean Sea water and heat budgets simulated by an ensemble of high resolution regional climate models". *Climate Dynamics*. Vol. 37, pp. 2067-2086.
- Soto-Navarro J., Criado-Aldeanueva F., García Lafuente J., Sánchez-Román A. (2010). "Estimation of the Atlantic inflow through the Strait of Gibraltar from climatological and in situ data", *Journal of Geophysical Research*. Vol. 115.

