

Variabilidad del nivel del mar en el Atlántico Norte con los principales modos atmosféricos

Marta Ballesteros^{1*}, María Nieves Lorenzo¹, Isabel Iglesias²

**martaballesteros@gmail.com*

¹*EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Faculdade de Ciências, Universidade de Vigo, Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain*

²*Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, Universidade do Porto, Avenida General Norton de Matos, s/n, 4450-208 Matosinhos, Portugal*

RESUMEN

Muchos son los factores que influyen en la variabilidad del nivel del mar y además dichos factores afectan a una gran variedad de escalas temporales con consecuencias que pueden llegar a ser devastadoras para el medio ambiente y la sociedad. En este trabajo se ha analizado la variabilidad anual e interanual del nivel del mar en el Atlántico Norte así como las tendencias en el período entre 1993 y 2013. Además también se ha estudiado la influencia de los principales modos atmosféricos del Atlántico Norte en los valores de las anomalías del nivel del mar. Para la realización de este estudio se utilizaron datos de altimetría de satélite de anomalías del nivel del mar procedentes de la base de datos CCI de la ESA

Palabras Clave: Nivel del mar, modos atmosféricos, tendencias, variabilidad

1. Introducción

El nivel medio global de los océanos es uno de los indicadores más importantes del cambio climático ya que es afectado por los principales procesos y alteraciones del sistema climático.

La variabilidad espacial en las tasas de elevación del nivel del mar se debe, sobre todo, a cambios no uniformes en la temperatura y salinidad, y guarda relación con los cambios en la circulación oceánica.

Antiguamente sólo se disponían de datos de mareógrafos costeros y de aquellos colocados a bordo de buques y boyas que permitían una medición del nivel del mar en puntos determinados. Las sucesivas misiones satelitales, que comenzaron en agosto de 1992, han permitido tener datos más precisos.

Estos datos disponibles desde 1993 señalan que el nivel del mar se ha elevado a un ritmo aproximado de 3 mm/año (IPCC, 2013).

El nivel del mar puede variar a diferentes escalas temporales (IPCC, 2007):

- Variabilidad a largo plazo
- Variabilidad estacional
- Variabilidad a corto plazo

A escala planetaria y a largo plazo los mecanismos de expansión térmica y fusión de la criosfera son los principales responsables de las variaciones observadas en el nivel del mar. En escalas menores otros mecanismos cobran importancia en el estudio de dicha variabilidad.

Este trabajo se centrará en el análisis de la variabilidad anual e interanual del nivel del mar en el área del Atlántico Norte con datos procedentes de la base de datos CCI de la ESA (Ablain *et al.*, 2015). El primer objetivo es el análisis comparativo entre datos obtenidos de mareógrafos y datos de satélite de las tendencias del nivel del mar en el área del Atlántico Norte en el período de 1993-2013 y de su variabilidad anual; el segundo será analizar cómo influyen los principales patrones atmosféricos que afectan a nuestra región en los valores de las anomalías del nivel del mar (SLA).

Los patrones de teleconexión se pueden definir como patrones de anomalías de presión y circulación atmosféricas que afectan a amplias áreas geográficas, expandiéndose sobre océanos y continentes (CPC-NOAA, 2008). Son estructuras no estacionarias que tienen una fuerte influencia sobre los procesos de interacción de la atmósfera y el océano, y pueden afectar al nivel del mar por medio de su efecto en los gradientes de presión, los flujos de calor y de agua dulce, la dirección y velocidad del viento y la circulación oceánica (Martínez-Asensio *et al.*, 2014). De esta forma los patrones de teleconexión son una excelente herramienta en la representación de la variabilidad del nivel del mar. Los patrones de teleconexión más importantes en la zona del Atlántico Norte, y que serán utilizados en este estudio, son la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), los patrones del Atlántico Este (EA), y Atlántico Este/Oeste de Rusia (EA/WR), el patrón Escandinavo (SCA) y el Patrón Polar Europeo/Eurasia (POL).

2. Datos y procedimiento

2.1. Datos

Para el estudio de las tendencias y de la dependencia del nivel del mar con los diferentes modos atmosféricos que afectan a nuestra región de estudio se han considerado los datos de altimetría satelital generados dentro del proyecto ESA CCI Sea Level (<http://www.esa-sealevel-cci.org/>). En concreto, se han considerado las series mensuales de anomalías del nivel del mar, dispuestas en una malla con una resolución de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ para el período comprendido entre Junio de 1993 y diciembre del 2013.

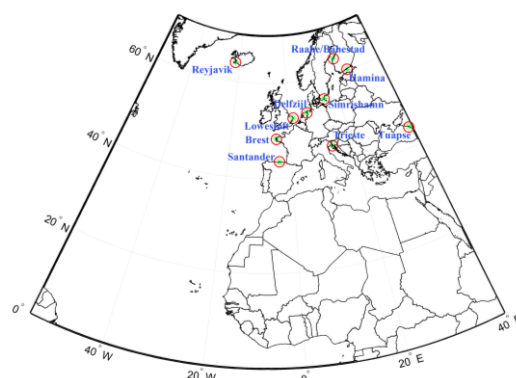


Fig. 1. Área de estudio y localización de los 10 mareógrafos escogidos para la realización de este estudio. El círculo rojo hace referencia a los datos de mareógrafos in-situ (boyas) y el asterisco verde a los datos de satélite extraídos de la malla de 0.25° .

Los datos de altimetría procedentes de boyas se han obtenido a través de la base de datos del Servicio Permanente para el Nivel del Mar (PSMSL) (<http://www.psmsl.org/data/obtaining/>). El círculo rojo en la Fig. 1 hace referencia a las boyas y el asterisco a los datos de satélite.

Los datos mensuales de los cinco patrones de teleconexión considerados (NAO, EA, EA/WR, SCA y POL) se han obtenido del Centro de Predicción Climática (CPC) de la NOAA (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/tele/doc>).

Datos de viento a 10 m y presión a nivel del mar (SLP) fueron obtenidos del

NCEP/NCAR Reanalysis con una resolución de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>). También se tomaron datos de temperatura superficial del mar (SST) de la base de datos de NOAA Optimum Interpolation (OI) SST V2 con una resolución $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (<https://www.ncdc.noaa.gov/oisst>).

2.2. Métodos

Se han calculado las anomalías de nivel del mar para toda el área de estudio tanto con datos de satélite como con datos procedentes de mareógrafos.

En el análisis de las diferentes series se procedió al cálculo del ciclo anual de la anomalía del nivel del mar en los diferentes puntos mostrados en la Fig. 1 y posteriormente se compararon las series procedentes de satélite y de mareógrafo calculando la correlación de Pearson, la desviación estándar y la raíz cuadrática media para ver la semejanza entre las series (Ruiz-Echeverry *et al.*, 2015).

El cálculo de las tendencias se hizo a través del test Man-Kendal (Mann, 1945; Kendall, 1975). Para el cálculo de las correlaciones se empleó el método de Pearson y la prueba T-Student para encontrar aquellas correlaciones significativas al 95%. Este análisis se hizo estacionalmente, calculando los valores medios estacionales de la SLA del área considerada y también los valores medios estacionales de los índices de los patrones atmosféricos. Los periodos estacionales se han tomado según el siguiente criterio: invierno (diciembre-febrero: DEF), primavera (marzo-mayo: MAM), verano (junio-agosto: JJA) y otoño (septiembre-noviembre: SON).

Por último se construyeron los mapas promedio de vientos y presiones a nivel del mar junto con los promedios de

anomalías de SST para aquellos años en que los patrones atmosféricos considerados mostraron fases positivas.

3. Resultados

3.1. Comparación entre datos de satélite y de mareógrafo

En la Fig. 2 se muestra el ciclo anual de las 10 localizaciones escogidas para comparar los resultados obtenidos entre datos de satélite y datos procedentes de mareógrafos. Los datos de mareógrafo están representados en color rojo mientras que los datos de satélite se muestran en color azul. Puede observarse que el valor mínimo anual de la SLA obtenido con datos de satélite tiene lugar entre los meses de mayo y junio, salvo en Reykjavik que tiene un desplazamiento hacia el mes de abril. Tuapse, localizada en el mar Negro sigue una dinámica opuesta al resto de estaciones, debido a la propia dinámica de este mar semicerrado y muestra el mínimo anual en noviembre. Los valores máximos anuales se alcanzan durante el período invernal, que en Lowestof abarca hasta el mes de octubre. La estación de Tuapse con su dinámica opuesta al resto de estaciones presenta el máximo anual en junio.

Los datos de mareógrafo cualitativamente muestran ciclos anuales muy similares a los observados con datos de satélite aunque en aquellos puntos localizados en el mar del Norte y en el mar Báltico (Lowestoft, Delfzijl, Simrishamn, Raahe y Hamina) presentan desfases con respecto a los datos de satélite cercanos a un mes en los valores mínimos. La razón puede estar en las características de estas localizaciones que se encuentran en aguas poco profundas y sometidas a placas de hielo semipermanentes (Vinogradov and Ponte, 2010).

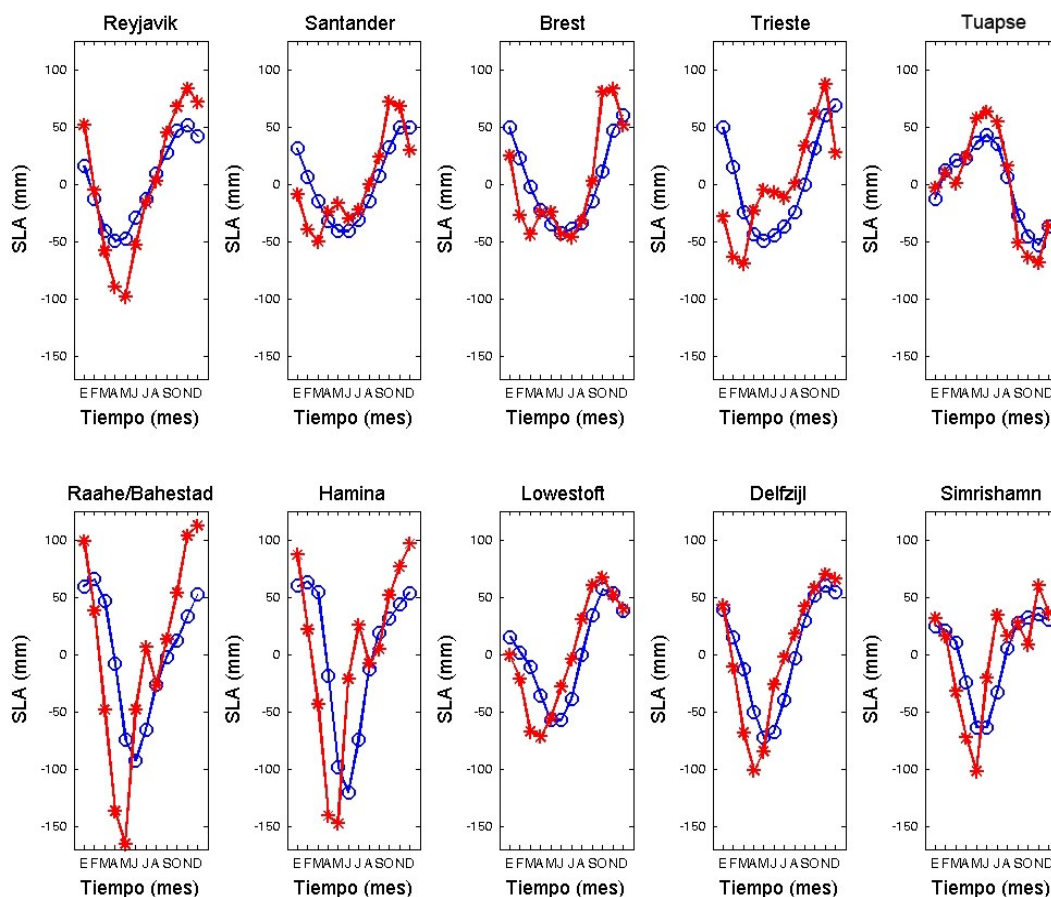


Fig. 2. Ciclo anual mareógrafos-satélite. Rojo: Mareógrafos; Azul: Satélite

| Nombre | Tend. S. (cm/dec) | Tend. M. (cm/dec) | Corr. | RMSD (cm) | Std. M. (cm) | Std. S. (cm) |
|----------------|----------------------|----------------------|-------|--------------|-----------------|-----------------|
| Reykjavick | 3.52* | 4.10* | 0.68 | 8.0 | 8.95 | 4.96 |
| Santander | 2.58* | 2.63* | 0.50 | 8.08 | 7.08 | 3.95 |
| Brest | 2.41* | 1.64* | 0.46 | 8.25 | 8.51 | 5.36 |
| Trieste | 2.64* | 4.14* | 0.52 | 7.68 | 8.59 | 5.69 |
| Tuapse | 2.1 | 3.7 | 0.84 | 5.24 | 8.79 | 7.10 |
| Raahe/Bahestad | 4.81* | -4.29* | 0.55 | 16.96 | 19.88 | 10.72 |
| Hamina | 4.66* | 2.33 | 0.62 | 16.22 | 20.2 | 12.7 |
| Lowestoft | 0.07 | 3.90* | 0.45 | 7.74 | 7.33 | 6.43 |
| Delfzijl | 2.65* | 2.35 | 0.55 | 11.13 | 13.15 | 6.78 |
| Simrishamn | 3.45* | 3.04* | 0.60 | 10.60 | 12.6 | 8.56 |

TABLA 1. Tendencias y parámetros estadísticos de las series de datos de satélite y los datos de mareógrafos. (Tend. S. tendencia datos de satélite, Tend. M. tendencia datos de mareógrafo, Corr. Correlación de Pearson calculada entre los datos de satélite y los de mareógrafos, RMSD raíz cuadrática media, Std. M. desviación estándar datos de mareógrafo, Std. S. desviación estándar datos de satélite, * señala las tendencias significativas al 95%)

En la Tabla 1 se muestran las tendencias y los principales parámetros estadísticos de las series de datos de satélite y los datos de mareógrafos, de ella se concluye que las mayores desviaciones estándar y las mayores diferencias entre los datos procedentes de mareógrafos y los de altimetría satelital, tienen lugar en las estaciones localizadas en latitudes altas y mares de aguas poco profundas.

En cuanto a los valores de las correlaciones estos presentan valores en la mayoría de los casos por encima de 0.5, mostrando una concordancia significativa entre los datos de satélite y los de boyas. Las tendencias son en su mayor parte significativas y todas (con excepción de Raahe/Bahestad para mareógrafos) positivas, lo que corrobora los resultados del IPCC que muestran que existe un aumento del nivel del mar. Además, los valores de las tendencias son elevados, variando desde 2.41 a 4.81 cm/dec para los datos de satélite y entre 1.64 y 4.14 cm/dec para los datos de mareógrafo.

3.2. *Influencia de los índices atmosféricos sobre la SLA del Atlántico Norte.*

En la Fig. 3 se muestran los mapas de correlación entre los principales índices atmosféricos que afectan a la región del Atlántico Norte y las anomalías de SLA para el periodo invernal. Para este periodo el índice POL apenas presenta áreas de correlación significativa con lo que no se muestra su mapa de correlación.

El índice NAO, presenta una correlación positiva sobre el mar

Báltico y el mar del Norte que se puede explicar por las presiones atmosféricas anormalmente bajas que tienen lugar en dicha zona durante la fase positiva de dicho índice. Las bajas presiones inducen un incremento en el nivel del mar debido al efecto del barómetro invertido. Por su contra en el mar Negro, y parte del Mediterráneo las correlaciones con el índice NAO son negativas, ya que en este caso las presiones allí presentes son anormalmente altas (Iglesias, 2010).

EA, muestra correlaciones positivas sobre la costa oeste del continente Europeo, Mediterráneo occidental y una banda de la costa Africana, relacionada con el patrón de vientos y el efecto de Coriolis.

EA/WR muestra una correlación positiva debido al efecto termoestérico y al efecto del barómetro invertido (Wakelin *et al.*, 2003) sobre la Costa Atlántica y la costa Africana.

El índice SCA presenta una correlación negativa sobre el mar Báltico debido a las altas presiones sobre esta región en su fase positiva.

En la figura 4 se observa que el índice POL presenta áreas de influencia significativas en los meses de primavera. Se observan correlaciones negativas sobre el mar Negro debido al efecto termoestérico y positivas sobre el mar de Noruega. El resto de índices no presentan valores de interés relevante salvo el índice SCA que mantiene su correlación negativa con la SLA del mar Báltico.

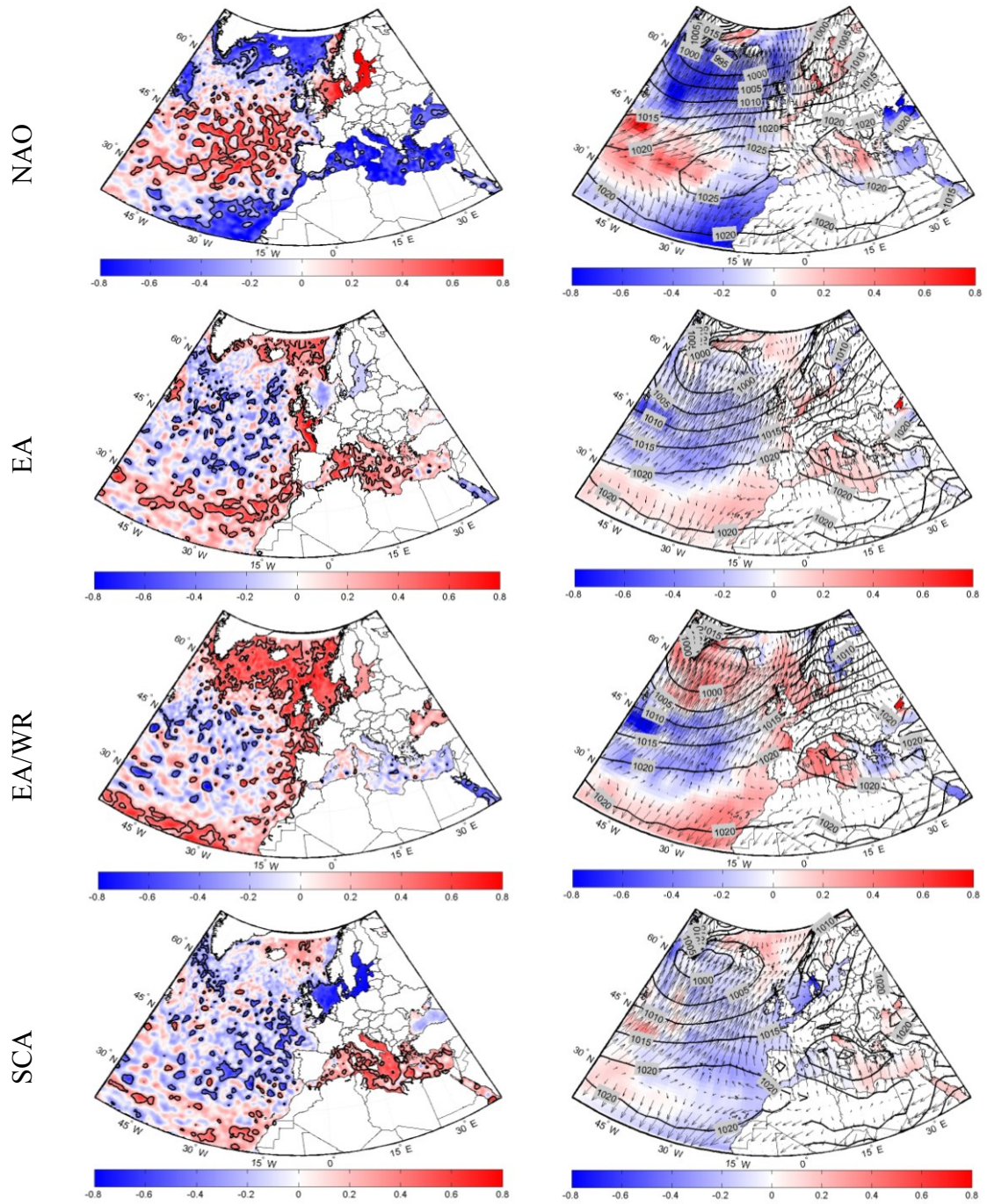


Fig. 3. En la columna de la izquierda se muestra la distribución espacial de las correlaciones significativas entre la SLA y los diferentes modos atmosféricos considerados para el periodo DEF. En la columna de la derecha se muestran los composites de la SLP y vientos promedios junto con las anomalías de SST para los años en los que el modo atmosférico correspondiente tiene fase positiva en el periodo DEF.

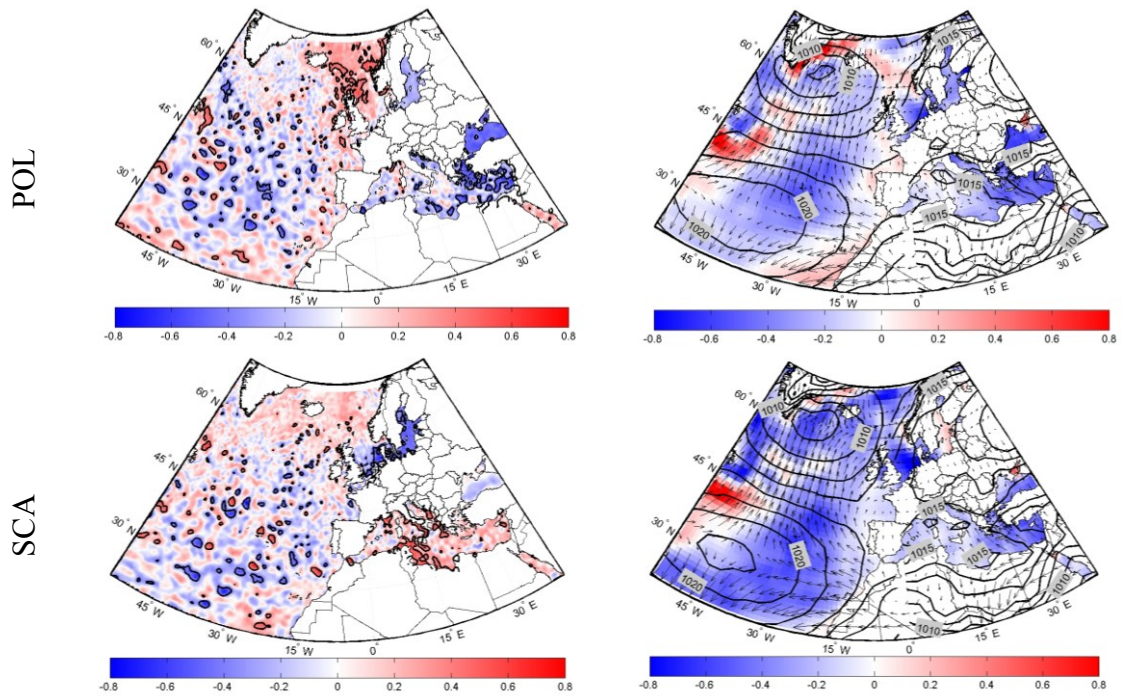


Fig. 4. En la columna de la izquierda se muestra la distribución espacial de las correlaciones significativas entre la SLA y los diferentes modos atmosféricos considerados para el periodo MAM. En la columna de la derecha se muestran los composites de la SLP y vientos promedios junto con las anomalías de SST para los años en los que el modo atmosférico correspondiente tiene fase positiva en el periodo MAM.

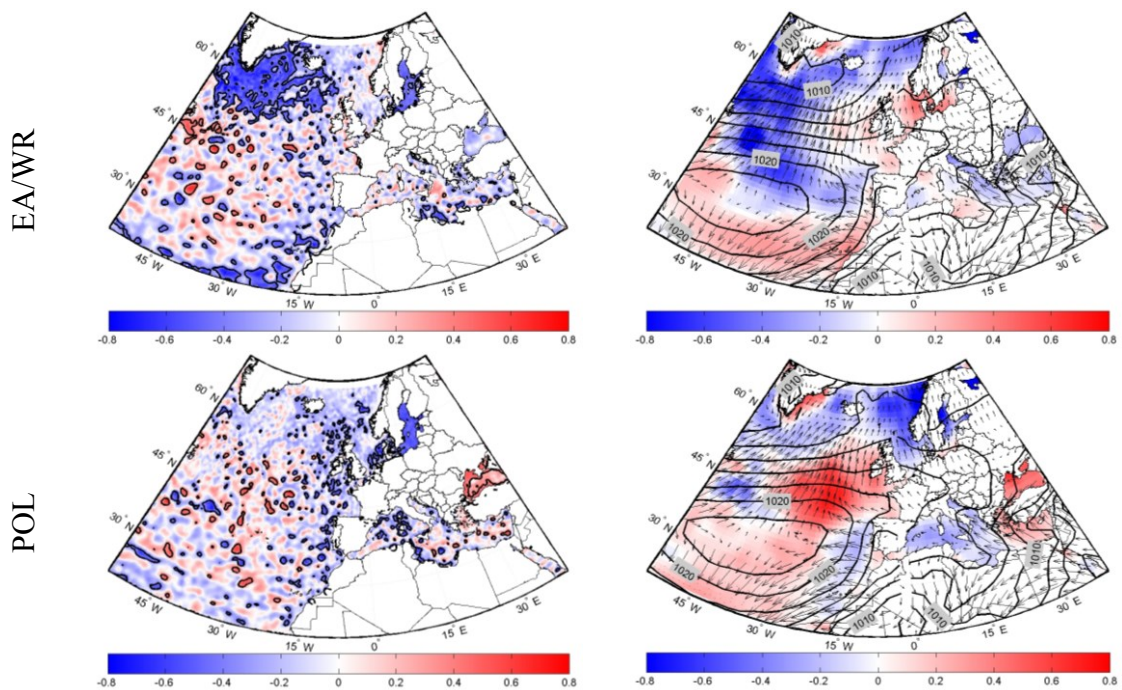


Fig. 5. En la columna de la izquierda se muestra la distribución espacial de las correlaciones significativas entre la SLA y los diferentes modos atmosféricos considerados para el periodo JJA. En la columna de la derecha se muestran los composites de la SLP y vientos promedios junto con las anomalías de SST para los años en los que el modo atmosférico correspondiente tiene fase positiva en el periodo JJA.

En verano (Fig. 5.) son los índices EA/WR y POL los que presentan correlaciones significativas. Estas son negativas con el índice EA/WR sobre el sur de Groenlandia, Islandia y el mar Báltico, en las dos primeras áreas el principal responsable de dichas correlaciones parece ser el efecto termoestérico tal y como indican las anomalías de SST. Sobre el mar Báltico el causante es el efecto del barómetro invertido. Con el índice POL, se observan también correlaciones negativas con el mar Báltico y positivas con el mar Negro posiblemente

motivadas por las anomalías de SST (Fig. 5).

En otoño se recupera la correlación positiva entre el índice NAO y el mar Mediterráneo aunque con menor intensidad que en el periodo invernal observándose la correlación negativa de NAO sobre el Mediterráneo. También el índice EA/WR muestra correlaciones en este caso positivas con la SLA de parte del mar Mediterráneo, estas tienen una clara componente termoestérica debida a las anomalías positivas de SST en esa misma región (Fig.6).

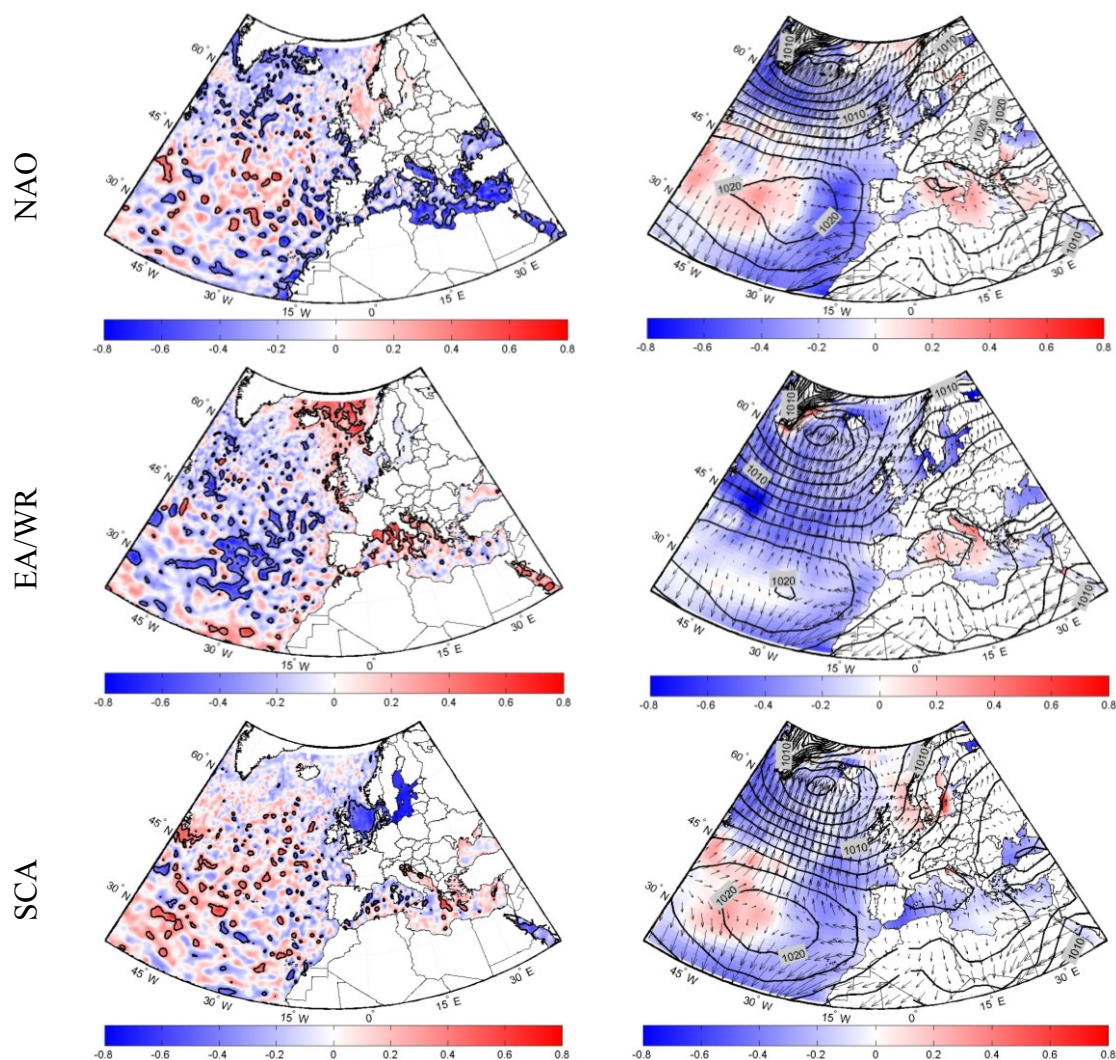


Fig. 6. En la columna de la izquierda se muestra la distribución espacial de las correlaciones significativas entre la SLA y los diferentes modos atmosféricos considerados para el periodo SON. En la columna de la derecha se muestran los composites de la SLP y vientos promedio junto con las anomalías de SST para los años en los que el modo atmosférico correspondiente tiene fase positiva en el periodo SON.

Al este de Islandia se repite las correlaciones positivas en este caso posiblemente debidas a las condiciones de presión y vientos que tienen lugar durante la fase positiva de este índice. Por otro lado cabe destacar también las correlaciones negativas observadas en el Atlántico frente a la Península Ibérica que parecen ser debidas a la conjunción de altas presiones y anomalías negativas de temperatura (ver Fig. 6). Por último decir que el índice SCA mantiene también en otoño su correlación negativa con la SLA del mar Báltico

4. Conclusiones

En este artículo se han mostrado los resultados para la comparativa entre los datos de satélite y los de mareógrafo y cómo influyen los índices atmosféricos sobre la SLA. Por tanto en la comparativa entre los datos de satélite y de mareógrafo se muestra que las mayores diferencias se dan en mares de aguas poco profundas y en latitudes altas, donde las aguas permanecen heladas gran parte del año. El análisis de las series temporales muestra que los máximos de la SLA se producen en los meses invernales y los mínimos en mayo y junio.

El cálculo de las tendencias de la SLA en los diferentes puntos muestra en ambos tipos de medición una tendencia positiva aunque no siempre significativa.

En relación con la influencia de los índices atmosféricos, NAO, aparece como el principal modo de variabilidad del Atlántico Norte. Su influjo sobre la SLA es más marcado en los meses de invierno. EA, es muy similar a NAO, con una importante influencia en los meses invernales. El efecto de EA/WR puede ser observado en los meses de invierno y verano. SCA afecta durante

todo el año a la SLA del mar Báltico y la influencia del índice POL, se observa en primavera y verano sobre la SLA de los mares de Noruega y Báltico respectivamente y sobre el mar Negro en ambos periodos.

Agradecimientos

A mi tutora, la profesora María Nieves Lorenzo por su gran ayuda y colaboración en cada momento de consulta y soporte en este trabajo.

A la profesora Isabel Iglesias por sus consultas interpretativas dónde me ofreció su apoyo en la mejor comprensión de partes de este artículo.

Referencias

- Ablain, M., A. Cazenave, G. Larnicol, M. Balmaseda, P. Cipollini, Y. Faugère, M.J. Fernandes, O. Henry, J.A. Johannessen, P. Knudsen, O. Andersen, J. Legeais, B. Meyssignac, N. Picot, M. Roca, S. Rudenko, M.G. Scharffenberg, D. Stammer, G. Timms, and J. Benveniste (2015), Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project, *Ocean Science* 11, 67-82, doi:10.5194/os-11-67.
- CPC-NOAA (2008), Climate Prediction Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/teleintro.shtml>.
- Iglesias, I., M.N. Lorenzo, J.J. Taboada, and M. Gómez-Gesteira (2010), Predictability of winter and autumn teleconnection patterns in North Atlantic by means of sea surface temperature. *International Journal of Climatology* 30, 980-990.

- IPCC (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press.
- IPCC (2013), *Cambio Climático 2013: La base científica física. Contribución del grupo de trabajo I del Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. TF Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, SK Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, y PM Midgley, (eds.), Cambridge University Press.
- Kendall, M.G. (1975), *Rank correlation methods* 4th Ed., Charles Griffin, Londres.
- Mann, H.B. (1945), Non-parametric test against trend. *Econometrica*, 13, 245-249.
- Martínez-Asensio, A., M. Marcos, M.N. Tsimplis, D. Gomis, S. Josey and G. Jordà (2014), Impact of the atmospheric climate modes on Mediterranean sea level variability. *Global and Planetary Change* 118, 1-15. doi:10.1016/j.gloplacha.2014.03.007
- Ruiz Etcheverry, L.A., M. Saraceno, A.R. Piola, G. Valladeau, and O.O. Moller (2015), A comparison of the annual cycle of sea level in coastal areas from gridded satellite altimetry and tide gauges. *Continental Shelf Research* 92, 87-97.
- Vinogradov, S.V. and R.M. Ponte, (2010), The mean seasonal cycle in sea level estimated from a data-constrained general circulation model. *Journal of Geophysical Research* 115, C04021, doi:10.1029/2009JC005767.
- Wakelin, S.L., P.L. Woodworth, R.A. Flather and J.A. Williams, (2003), Ssea-level dependence on the NAO over the NW European Continental Shelf. *Geophysical Research Letters* 30(7), 1403, doi:10.1029/2003GL017041.