

Utilización del momento angular relativo para el estudio de NAO/AO

Laura DE LA TORRE RAMOS¹, Pedro RIBERA RODRÍGUEZ², Luis GIMENO PRESA¹,
Juan Antonio AÑEL CABANELAS¹ y Raquel NIETO MUÑOZ¹

¹ Universidad de Vigo (Campus de Ourense). Departamento de Física Aplicada
ltr@uvigo.es

² Universidad Pablo de Olavide. Departamento de Ciencias Ambientales

RESUMEN

La variabilidad climática en la región extratropical del Atlántico Norte está en gran parte determinada por un modo de variabilidad denominado Oscilación del Atlántico Norte —NAO— u Oscilación Ártica —AO—. La diferencia en la denominación es debida a los distintos puntos de vista desde los que se considera este modo de variabilidad: regional en el primer caso o anular en el segundo. Aunque los efectos sobre el clima del Atlántico Norte puedan ser similares, su base física es muy distinta, sobre todo en cuanto a su estructura espacial. El objetivo de este trabajo es estudiar esta estructura espacial, para lo cual se utiliza una magnitud ligada a ella: el momento angular relativo (RAM). Se realizaron comparaciones entre las series temporales de ambos modos (índices) y las de RAM para ver similitudes y mapas de correlaciones entre RAM y temperatura y altura geopotencial para todo el hemisferio. Los resultados muestran un patrón que no está restringido al Atlántico Norte, pero que tampoco resulta puramente anular.

Palabras clave: Oscilación del Atlántico Norte, Oscilación Ártica, momento angular relativo de la atmósfera.

Using relative angular momentum to study NAO/AO

ABSTRACT

North Atlantic extratropical variability is highly dominated by a variability mode called North Atlantic Oscillation —NAO— or Arctic Oscillation —AO—. The difference in the nomenclature is due to the different points of view from which this variability mode is analysed: regional in the first case and annular in the second one. Although the effects over North Atlantic Climate can be similar, subjacent physical processes are very different, especially when spatial structures are compared. This work is focussed on the study of this spatial structure. Therefore a magnitude related to this structure is used: relative angular momentum (RAM). A comparative study between temporal series of both modes (indices) and RAM was performed in order to look for similarities, as well as correlation maps between RAM and Temperature and geopotential height data for the whole Hemisphere. Results show a pattern that is not restricted to the North Atlantic but does not show a purely annular character.

Keywords: North Atlantic Oscillation, Arctic Oscillation, atmospheric relative angular momentum.

SUMARIO: 1. Introducción. 2. Cálculo de RAM. 3. Comparación del momento angular relativo con los índices NAO y AO. 4. Estructura espacial. 5. Conclusiones. 6. Referencias bibliográficas.

1. INTRODUCCIÓN

A principios del siglo XX se identificó a la Oscilación del Atlántico Norte —NAO— como el patrón más influyente en el clima europeo. Físicamente, consiste en un transporte

meridional de masa atmosférica entre las regiones del anticiclón subtropical de Azores y del sistema de bajas presiones subpolar de Islandia. Este intercambio se manifiesta en la temperatura del océano y la atmósfera, la precipitación y la presión en superficie. Más adelante se introdujo la Oscilación Ártica (AO, Thompson y Wallace 1998), también llamada Modo Anular del Hemisferio Norte (NAM, Wallace 2000), como un modo hemisférico de intercambio de masa entre la región ártica y latitudes medias muy similar a NAO. A partir de entonces comenzó un debate sobre la dinámica subyacente al modo principal de variabilidad en latitudes extratropicales del hemisferio norte (véase por ejemplo: de la Torre et al. 2002) al que este trabajo intenta contribuir introduciendo en su estudio una magnitud poco utilizada en estudios climáticos: el momento angular relativo atmosférico (RAM).

El momento angular atmosférico tiene dos componentes, una relacionada con la presión y otra relacionada con el viento zonal. La variabilidad de la primera es despreciable a las escalas temporales con las que vamos a trabajar, por lo que nos centraremos únicamente en la segunda, es decir, RAM (Peixoto y Oort 1992). Esta es una magnitud zonalmente simétrica por definición, es decir, anular, una característica que también tiene el modo principal de variabilidad según Thompson y Wallace (1998). La variabilidad de RAM está dominada por el viento zonal y, en consecuencia, por NAO y AO. Cuando AO/NAO está en fase positiva (negativa) -disminuye (aumenta) la presión sobre el polo/Islandia y aumenta (disminuye) sobre latitudes medias/Azores-, los vientos del oeste alrededor de 45°N se hacen más (menos) intensos. Parece razonable, por tanto, esperar que exista una repercusión sobre RAM, que se convierte así en una medida de estas anomalías a escala planetaria.

La ventaja de utilizar RAM como una herramienta de diagnóstico del clima se debe a su relación con importantes características climáticas como bloqueo o trayectoria de las depresiones, puesto que está ligado a la zonalidad del índice de circulación. Valores bajos de RAM implican un aumento de la frecuencia de bloqueo, mientras que los valores altos están relacionado con una disminución de la misma. Con valores altos de RAM los ciclones son más frecuentes en el centro-este del Atlántico Norte y el norte del Pacífico Norte. Sin embargo, si los valores son bajos son más frecuentes en el Mediterráneo y latitudes medias del Pacífico Norte. Los anticiclones tienden a moverse desde el océano hasta el medio de los continentes y hacia latitudes más altas a medida que decrece el valor de RAM (Bradbury 1958).

Entonces, se puede usar RAM como herramienta para medir la zonalidad de la circulación y su variabilidad debería, por tanto, estar relacionada con NAO y AO. Para confirmarlo, se empezará comparando el comportamiento temporal de las tres series, con especial interés en conocer si coinciden sus características más importantes. Una de ellas es la tendencia positiva significativa que se ha producido en AO/NAO desde los años 60. Es interesante porque este cambio está asociado con un enfriamiento sobre el oeste del Atlántico Norte y un calentamiento sobre el continente euroasiático.

Una vez comparados los comportamientos en el tiempo, se estudiará la estructura espacial. Wallace (2000) señaló que una manera de dilucidar cuál es la base dinámica del modo, aparte de experimentos numéricos, es mediante criterios relacionados con los impactos en el clima. Por eso, en esta segunda parte se intentará averiguar, mediante comparación con RAM, cómo son de anulares la variabilidad de la temperatura y la

altura geopotencial, dos magnitudes muy influenciadas por AO / NAO, en varios niveles de la troposfera.

2. CÁLCULO DE RAM

Para calcular el momento angular relativo diario se partió de los valores de viento zonal del reanálisis NCAR/NCEP y se siguió el mismo procedimiento que en de la Torre et al. (2002). Después se calcularon los promedios anuales y sus anomalías para cada círculo de latitud en los estratos 500-200hPa y 850-500hPa. Asimismo, para el estrato 500-200hPa, se calculó el RAM del casquete polar 55°N-90°N completo y dividido en sectores de 60° de longitud.

En primer lugar, se analizaron las correlaciones entre RAM y los índices invernales de NAO y AO. A continuación, se obtuvieron las regresiones lineales de los tres con el fin de establecer la existencia o no de tendencias. Finalmente, se realizó un análisis «wavelet» de las series invernales de las tres magnitudes para identificar posibles oscilaciones concordantes. Se debe tener en cuenta que el objetivo de estos tres puntos es únicamente el de comparar el comportamiento de las tres series. Los índices utilizados fueron el de Hurrell (1995) para NAO y el de Thompson y Wallace (1998) para AO.

El análisis de los seis sectores zonales mencionados anteriormente se realizó para comprobar el carácter anular de estas magnitudes a partir de su simetría. Se obtuvieron las correlaciones entre las anomalías del RAM de cada sector, al igual que su evolución temporal. Las anomalías del momento angular relativo se correlacionaron con las medias anuales de temperatura y altura geopotencial para cada punto de red y para los tres niveles de presión disponibles (200, 500 y 850 hPa) en el Hemisferio Norte. Estas últimas correlaciones se representaron en un mapa hemisférico para comprobar el carácter anular.

3. COMPARACIÓN DEL MOMENTO ANGULAR RELATIVO CON LOS ÍNDICES NAO Y AO

Para empezar, se estudia la distribución del momento angular por latitudes para niveles altos —RAM₅₀₀₋₂₀₀— y niveles bajos —RAM₈₅₀₋₅₀₀—. La Fig. 1 muestra la distribución geográfica de las medias anuales de momento angular relativo. El máximo está localizado alrededor de 55°N, tanto en 850-500hPa como en 500-200hPa. Además, el valor de RAM es siempre mayor en altura, como corresponde a una magnitud que depende tanto de la intensidad del viento.

Para comparar comportamientos temporales, una herramienta sencilla es el cálculo de correlaciones lineales. La correlación máxima entre el índice AO y las anomalías del momento —Fig. 2a— se obtiene para los casquetes 50-90°N y 55-90°N. Los casquetes 80-90°N y 85-90°N muestran correlaciones no significativas.

Los coeficientes de correlación entre la Oscilación del Atlántico Norte y los casquetes de momento —Fig. 2b— alcanzan un máximo en 25-30°N y se mantienen aproximadamente constantes hasta 55°N. Los casquetes más al norte de 70° no muestran

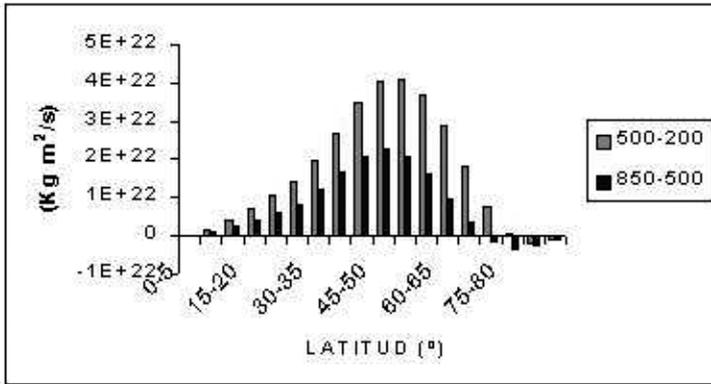


Figura 1. Media anual del momento angular relativo por anillos de 5° de latitud para los estratos 500-200hPa y 850-500hPa.

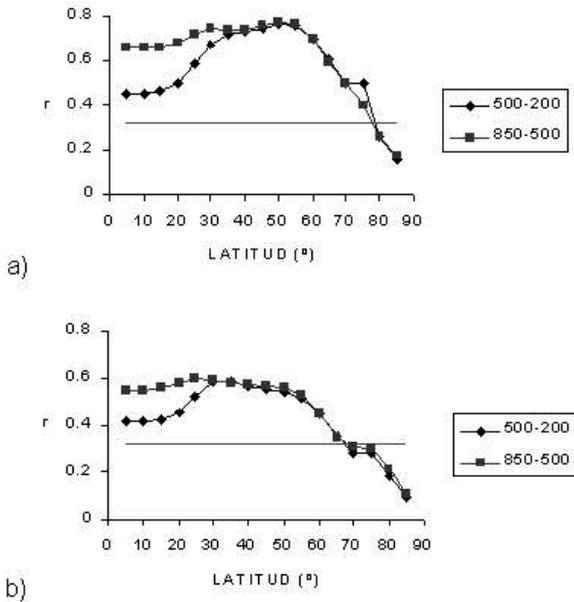


Figura 2. Correlaciones entre las anomalías anuales de RAM para los casquetes con frontera en la latitud indicada en el eje x en los estratos 500-200hPa y 850-500hPa y a) el índice invernal de AO, y b) el índice invernal de NAO. La línea horizontal indica el límite de confianza al 95%.

correlaciones significativas. Aparte de esto, si se comparan los valores en las Figuras 2a y 2b, se observa que las correlaciones con AO son siempre mayores que con NAO —para cada casquete y nivel—.

Tabla 1. Índices de correlación entre RAM, calculado para los distintos sectores longitudinales o el casquete polar completo —a partir de 55°N— en el estrato 500-200hPa, y el índice invernal de AO o el de NAO. Los valores son significativos al 95% —excepto *—

	AO invernal	NAO invernal
0-60°E	0,575	0,433
60-120°E	0,569	0,411
120-180°E	0,739	0,424
120-180°O	0,558	0,208*
60-120°O	0,621	0,544
0-60°O	0,593	0,496
Casquete completo	0,757	0,514

Las correlaciones entre las anomalías anuales del momento angular relativo para el casquete 55°-90°N completo y dividido en sectores de 60° de longitud vs. AO —Tabla 1— alcanzan un máximo de 0,74 en el sector 120°-180°E y superan 0,5 para todos los sectores. Las correlaciones con NAO son similares a las obtenidas con AO sólo para 0°-120°O, donde se encuentran los máximos en este caso, aunque todas están alrededor de 0,5 excepto en el sector 120-180°O, en el que bajan a 0,21. Este mínimo es la única correlación no significativa.

Que las correlaciones entre sectores sean tan bajas (Deser 2000) no niega el paradigma anular. Es más, el hecho de que, a pesar de su carácter local, las series temporales de NAO estén correlacionadas con una magnitud hemisférica -momento angular atmosférico- apoya este paradigma, porque hace pensar que su influencia no está limitada a la región atlántica, sino que tiene mayor extensión zonal.

Si comparamos cada serie por separado, las evoluciones anuales de NAO invernal, AO invernal y anomalías anuales del momento angular —Fig. 3— muestran características comunes:

- tendencias positivas causadas por los fuertes valores positivos que se han producido a partir de principios de los 80 y la predominancia de valores negativos en los 60. Estas tendencias son consecuentes con los resultados de varios estudios previos (por ejemplo: Hurrell 1995; Abarca del Río 1999; Rosen y Salstein 2000).
- los valores son exclusivamente positivos para el período 1988-1995.
- los picos de máximos y mínimos son muy similares —por ejemplo, los máximos de 1967, 1973, 1989—.

Para buscar períodos de oscilación comunes, se realizó un análisis *wavelet* (Torrence y Compo 1998) de los índices invernales de AO y NAO y de las medias invernales del momento angular relativo. Este tipo de análisis temporal permite detectar frecuencias de oscilación que sólo se han producido durante una parte del período estudiado. Al estudiar estos análisis se aprecia la existencia de una banda significativa de oscilación común centrada en 8-9 años (no se muestra la figura). Este resultado concuerda con

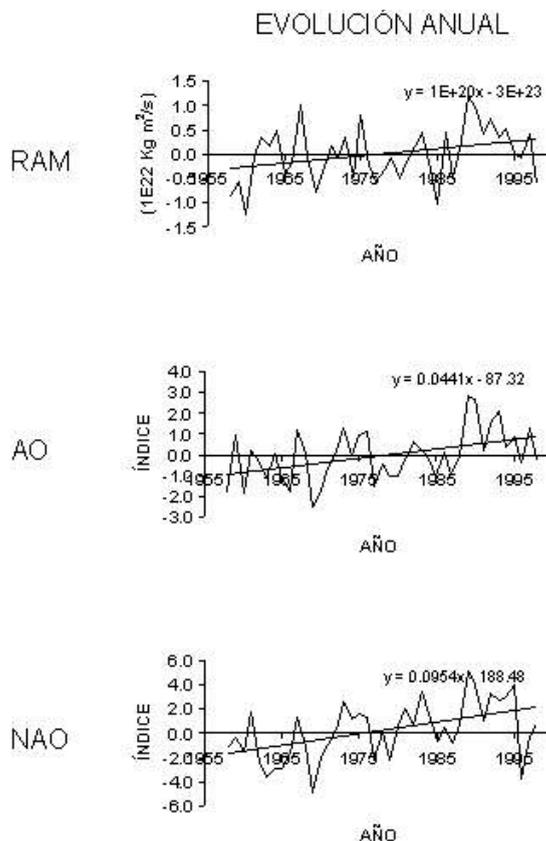


Figura 3. Evolución temporal y tendencia de las anomalías anuales de RAM (55-90°N, 500-200hPa), índice AO invernal e índice NAO invernal. Las tendencias son significativas la 95%.

Pozo-Vázquez et al. (2001), quienes encontraron en NAO una oscilación cuasiperiódica, con un período entre 6 y 10 años y una amplitud máxima de 8 años durante los períodos 1842-1868 y 1964-1994. La interpretación de este resultado debe hacerse con precaución debido a que la longitud de la serie (41 años) es pequeña para la banda encontrada.

4. ESTRUCTURA ESPACIAL

Una vez vista la similitud entre las series de RAM, NAO y AO, el estudio se centra en el análisis espacial de su posible carácter anular.

Como el objetivo es diagnosticar el Modo Anular del Hemisferio Norte a partir del momento angular relativo en función de su simetría zonal, debe tenerse en cuenta

que la principal contribución al RAM proviene del chorro. En caso de simetría zonal debe estar en fase en todo el hemisferio, no a altas frecuencias debido a las dorsales y vaguadas, pero sí a escala interanual. Esta es la razón por la cual se ha dividido el hemisferio en sectores de 60° de longitud y se han realizado las correlaciones entre ellos.

Si el modo es anular, se esperan buenas correlaciones entre los sectores, aún mejores si los sectores son adyacentes. Las regiones en las que sectores adyacentes no estén bien correlacionados, o los sectores que exhiban correlaciones bajas con la mayor parte de los otros, corresponden a áreas con pérdida de simetría anular y deben considerarse como un aspecto contrario al paradigma AO. De acuerdo con Deser (2000), la región del Pacífico es la mejor candidata para mostrar esta asimetría.

Las correlaciones entre anomalías anuales de $RAM_{500-200,55-90}$ correspondientes a los sectores longitudinales de 60° (Tabla 2) muestran que las regiones peor correlacionadas son $120^\circ\text{E}-120^\circ\text{O}$ vs. $0-60^\circ\text{O}$, mientras que los sectores mejor correlacionados son los adyacentes —con índices alrededor de 0,7—, excepto $60-120^\circ\text{O}$ vs. $120-180^\circ\text{O}$, que presentan baja correlación entre ellos. Así, el sector $120-180^\circ\text{O}$ está poco correlacionado con cualquiera de los otros sectores, excepto $120-180^\circ\text{E}$. Esto confirma que la simetría anular de RAM se rompe principalmente en el Pacífico, sobre todo en la mitad de Norteamérica.

Las correlaciones de RAM global, con temperatura y altura geopotencial para los tres niveles analizados —Fig. 4— prueban que, para ambas magnitudes, la región ártica está dominada por correlaciones muy negativas, en el caso de T desplazadas. Es decir, valores elevados del momento angular relativo están asociados a valores bajos de la altura geopotencial, y viceversa. Por el contrario, las latitudes medias están dominadas por correlaciones positivas, pero en este caso no existe un patrón regular, sino regiones significativas intermitentes -algunas zonas de correlaciones no significativas presentan índices negativos-.

En latitudes medias del Atlántico se encuentran correlaciones mucho mayores que en las del Pacífico, no estando el sector del Pacífico norteamericano significativamente correlacionado con RAM.

Al utilizar sectores longitudinales de $RAM_{500-200,55-90}$ se encuentran resultados parecidos. La Fig. 5 muestra los índices de correlación con la altura geopotencial en

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre sectores longitudinales de RAM ($55-90^\circ\text{N}$, $500-20\text{hPa}$)

	0-60°E	60-120°E	120-180°E	120-180°O	60-120°O
0-60°E	–				
60-120°E	0,73	–			
120-180°E	0,70	0,68	–		
120-180°O	0,46	0,44	0,74	–	
60-120°O	0,50	0,51	0,51	0,47	–
0-60°O	0,68	0,57	0,47	0,39	0,74

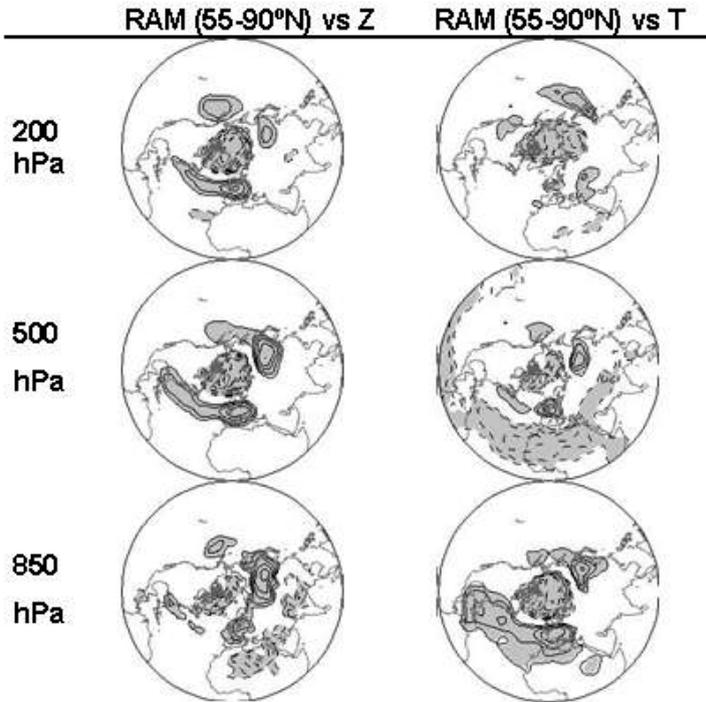


Figura 4. Mapas de correlaciones entre RAM (500-200hPa) sin dividir por sectores y la temperatura (T) o la altura geopotencial (Z) en 200, 500 y 850 hPa. Están sombreados los índices significativos al menos al 95%. Las líneas continuas indican correlación positiva y las discontinuas correlación negativa (sólo aparecen las de valor absoluto mayor o igual que 0.3, con intervalos de 0.1).

500hPa como ejemplo. Las conclusiones alcanzadas para los tres niveles son casi las mismas que para este caso particular. La banda polar de correlaciones negativas se encuentra en cada mapa. Además, se obtienen correlaciones positivas en latitudes medias, pero sin forma anular, y en latitudes bajas aparecen pocas regiones correlacionadas negativamente. Obviamente, las correlaciones son más fuertes en el sector con el que estamos trabajando, de manera que al utilizar RAM en 60-120°E se observa fundamentalmente una oscilación en Asia y al usar 120-180°O aparece un patrón parecido a PNA. En cualquier caso, es importante indicar que el océano Pacífico está correlacionado únicamente con el RAM del sector del Pacífico.

5. CONCLUSIONES

- Las correlaciones del momento angular relativo con los índices AO y NAO son buenas, pero mayores para el primero en cada sector, casquete y nivel, lo

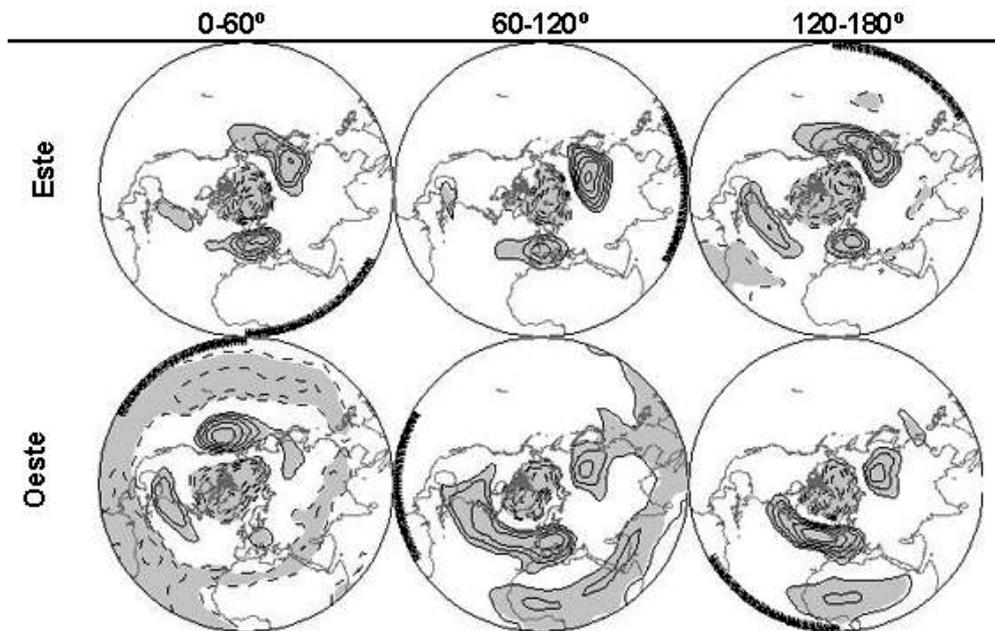


Figura 5. Mapas de correlaciones entre RAM (500-200hPa,55-90°N) dividido por sectores de 60° de longitud —marcados en los mapas— y la altura geopotencial en 500 hPa. Están sombreados los índices significativos al menos al 95%. Las líneas continuas indican correlación positiva y las discontinuas correlación negativa (sólo aparecen las de valor absoluto mayor o igual que 0.3, con intervalos de 0.1).

que implica que un índice calculado a partir de dos estaciones representativas de los centros de acción del Atlántico está demasiado restringido para describir plenamente el fenómeno. La variabilidad se mide mejor con un índice que refleje lo que sucede en una extensión mayor.

- Existe correlación con NAO en todos los sectores. Esto significa que la influencia no está limitada a la región del Atlántico Norte, sino presenta una mayor extensión zonal.
- Se debe tener en cuenta que, aunque los sectores utilizados en el análisis son geoméricamente iguales, su contribución al momento angular es diferente. La mayor parte de la varianza del campo de velocidad media zonal proviene de la contribución local en las dos regiones de salida del chorro sobre el Pacífico nordeste y el Atlántico Norte. El hecho de que estos dos sectores no estén correlacionados sugiere una pérdida de simetría respecto a lo que sería un modo anular propiamente dicho.
- Otro resultado que sugiere que no existe simetría anular es la intermitencia de las correlaciones entre RAM y la altura geopotencial o la temperatura en latitudes medias. Objetivo principal de este trabajo era la búsqueda de las

- características hemisféricas correspondientes a este tipo de variabilidad pero, aunque los resultados muestran claramente la parte ártica del dicho modo, en latitudes medias no existe un anillo continuo de correlaciones significativas.
- El hecho de que el sector del Pacífico 120°-180°O presente una baja correlación, incluso con un sector adyacente —América—, implica nuevamente la falta de la simetría esperable para un modo puramente anular.

En definitiva, el modo principal de variabilidad del hemisferio norte no está restringido a la región atlántica, pero tampoco es puramente anular. Estos resultados no pueden apoyar un Modo Anular del Hemisferio Norte entendido como organizado a lo largo de sectores latitudinales, ni tampoco un modo regional limitado al Atlántico. Un modo a lo largo del promedio climático de las líneas de corriente como Ambaum et al. (2001) exponen, donde la simetría zonal se dispararía debido a efectos orográficos (Yu y Hartmann 1995), es una alternativa posible que debería ser explorada.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABARCA DEL RÍO, R. (1999). The influence of global warming in Earth rotation speed. *Ann. Geophys.*, 17, 806-811.
- AMBAUM, M. H. P.; B. J. HOSKINS & D. B. STEPHENSON (2001). Arctic Oscillation or North Atlantic Oscillation? *J. Climate*, 14, 3495-3507.
- BRADBURY, D. L. (1958). On the behaviour patterns of the cyclones and anticyclones as related to zonal index. *Science*, 44, 2310-2323
- DE LA TORRE, L.; L. GIMENO, P. RIBERA, D. GALLEGO, R. GARCÍA & E. HERNÁNDEZ (2002). The use of atmospheric angular momentum to diagnose the Arctic oscillation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 197, 215-223.
- DESER, C. (2000). On the teleconnectivity of the «Arctic Oscillation». *Geophys. Res. Lett.*, 27, 779-782.
- HURRELL, J. W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation region temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676-679.
- PEIXOTO, J. P. & H. OORT (1992). *Physics of Climate*. Springer-Verlag New York Inc. New Work. 520 pp.
- POZO-VÁZQUEZ, D.; M. J. ESTEBAN-PARRA, F. S. RODRIGO & Y. CASTRO-DÍEZ (2001). A study of NAO variability and its possible non-linear influences on European surface temperature. *Climate Dyn.*, 17, 701-715.
- ROSEN, R. D. & D. A. SALSTEIN (2000). Multidecadal signals in the interannual variability of atmospheric angular momentum. *Climate Dyn.*, 16, 693-700.
- THOMPSON, D. W. J. & J. M. WALLACE (1998). The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1297-1300.
- TORRENCE, C. & G. P. COMPO (1998). A practical guide to wavelet analysis. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 61-78.
- WALLACE, J. M. (2000). North Atlantic Oscillation / Annular Mode: Two paradigms - One Phenomenon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 791-805
- YU, J. Y. & D. L. HARTMANN (1995). Orographic influences on the distribution and generation of atmospheric variability in a GCM. *J. Atmos. Sci.*, 52, 2428-2443.