

TENDENCIAS NA ESCALA SINÓPTICA PARA O SÉCULO XXI

J. J. Taboada¹, M. N. Lorenzo² e L. Gimeno²

¹ MeteoGalicia. CINAM

Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible - Xunta de Galicia.

² Facultade de Ciencias

Campus de Ourense

Universidade de Vigo. E-32004 Ourense.

Correo_e: uscfmjth@cesga.es

RESUMO

O obxectivo deste traballo é analizar a variabilidade sinóptica no século XXI. Para isto, estudáronse os modos de variabilidade atmosféricos e, máis concretamente, as tendencias cara ao futuro da NAO (North Atlantic Oscillation). Esta oscilación é o primeiro modo de variabilidade atmosférico no Atlántico norte e ten existencia física tanto en superficie como en altura. O estudo previo do comportamento deste modo de oscilación durante a segunda metade do século XX amosou só a variabilidade decadal que se produce de xeito natural, pero ningunha tendencia asociada ao cambio climático. Tomando os resultados dos modelos participantes no cuarto informe de avaliación do IPCC, pódese concluír que nas vindeiras décadas é moi probable que o valor deste modo de oscilación quede en valores predominantemente positivos, máis altos canta maior sexa a concentración de gases de efecto invernadoiro. Por outra banda, o estudo da frecuencia de aparición de diferentes tipos de tempo sinópticos en Galicia cos modelos do IPCC sinala a posibilidade de que aumenten as situacións anticiclónicas principalmente na primavera. Estas dúas tendencias terían como consecuencias previsibles unha diminución da pluviosidade media anual, particularmente na primavera e no verán, e impulsaría a tendencia ao ascenso das temperaturas.

SUMMARY

The aim of this work is to analyze the synoptic variability through the 21st century. To achieve this goal we have studied the behaviour of the NAO (North Atlantic Oscillation). This oscillation is the first mode of variability in North Atlantic and has physical existence both on surface and at height. A previous study of this mode of variability concluded that in the second half of the 20th century the NAO shows only decadal natural variability, but no tendencies associated to climate change. Taking into account the results of the models participating in the fourth assessment report (4AR) of the IPCC, we must conclude that in the next decades the NAO will be in its positive phase, with a high level of confidence. Moreover, the more greenhouse gas concentration increases, the more the NAO will be in positive values. The study of the frequency of appearance of the different weather types calculated for Galicia using also models participating in the 4AR IPCC shows the possibility of an increase of anticyclonic situations mainly in spring. The consequences expected from the tendencies of NAO and weather types are a reduction in annual mean rainfall, particularly in spring and summer, and this would also contribute to the increase of mean temperature.

INTRODUCIÓN

Neste capítulo pártese da idea de que se resolveron os problemas de detección e atribución do cambio climático (IPCC, 2007). É dicir, sábese que o clima está a cambiar nas últimas décadas e este cambio atribúeselles ás actividades humanas, sobre todo ao incremento na concen-

tración de gases de efecto invernadoiro debido á queima de combustibles fósiles. As ferramentas máis axeitadas para a análise da evolución deste cambio nas vindeiras décadas son os chamados modelos climáticos. Estes modelos simulan o comportamento da atmosfera, a criosfera, a litosfera a hidrosfera e a biosfera dun xeito integrado. A grande complexidade do sistema conxunto fai moi complicada a elaboración de prognósticos, en primeiro lugar pola imposibilidade de recrear nun laboratorio o sistema completo e poder deste xeito afinar os parámetros dos modelos e, por outra, debido á natureza non lineal das ecuacións. Esta natureza non lineal fai que as interaccións se produzan a diferente escala tanto espacial como temporal, o que dificulta os prognósticos para o futuro. De calquera xeito, os resultados dos modelos poden ser comparados coa realidade durante o século XX, o que dá unha seguridade para a consideración dos resultados para o clima do século XXI, se consideramos os valores medios tanto a nivel espacial como temporal.

Ás dificultades que poidan aparecer debido á intrincada natureza das ecuacións que describen a dinámica do clima, cómpre engadir que non coñecemos as denominadas condicións de contorno para o futuro. Cando os modelos son executados nas condicións do século XX, podemos introducir os valores tanto de variabilidade natural (actividade volcánica, actividade solar) como de variabilidade antropoxénica (aumento dos gases de efecto invernadoiro e variabilidade dos aerosois). Pero cando queremos coñecer a evolución do clima nas vindeiras décadas, carecemos destes valores *a priori*. Un xeito de afrontar este problema é definir diferentes escenarios tendo en conta as posibilidades reais para o vindeiro século, tanto para á evolución da cantidade de poboación, como para á eficiencia enerxética que se poida acadar nun futuro. Posteriormente, todos os modelos son executados seguindo eses escenarios. Esta é a técnica seguida polo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), no que os modelos participantes nos prognósticos tiveron que ser executados seguindo os diferentes escenarios previamente definidos.

Nun capítulo anterior deste mesmo informe os autores estudaron a variabilidade sinóptica das últimas décadas do século XX, tendo en conta os así denominados patróns de teleconexión, que como se probou en diferentes traballos, inflúen decisivamente sobre o clima galego (Lorenzo e Taboada, 2005; DeCastro *et al.*, 2006). O máis profusamente analizado destes patróns de teleconexión é a NAO (North Atlantic Oscillation). Isto é así porque este patrón ten unha existencia física que non se pode garantir para outros patróns, tales como o patrón EA (Eastern Atlantic), EA-WR (Eastern Atlantic-Western Russia) ou o patrón SCA (Scandinavia Pattern). Estes patróns xorden logo dunha análise de compoñentes principais, polo que se lles exige unha ortogonalidade que na realidade física pode non existir. Por iso, neste capítulo centrarémonos no estudo das tendencias futuras da NAO, definida tanto en superficie como en altura, utilizando as saídas dos modelos climáticos. Sábese que estes modelos non reproducen de xeito completo a variabilidade sinóptica, pero a intercomparación dos diferentes modelos confirman a habilidade xeral para reproducir este fenómeno (Osborn, 2004; Miller *et al.*, 2006). Anteriormente vimos como nas últimas décadas este modo de variabilidade atmosférico non presentaba tendencias significativas, fóra da variabilidade natural.

Por outra banda, anteriormente tamén se analizaron as tendencias dos denominados *weather types* definidos para Galicia (Lorenzo *et al.*, 2008). A diferente frecuencia de aparición destes tipos de tempo ten unha relación directa co clima en Galicia. Igual que sucede coa NAO, na segunda metade do século XX non se aprecian tendencias significativas en canto á frecuencia de aparición dos diferentes tipos de tempo. Deste xeito, puidemos concluír que as tendencias actuais asociadas ao cambio climático antropoxénico, principalmente o sostido aumento nas temperaturas medias das últimas décadas, non se pode atribuír á aparición de diferentes estados da atmosfera a nivel sinóptico, é que, polo tanto, deben ser explicadas por outras causas, entre as que se sinalaba como posibilidade a diferenza no balance radiativo que deixase diferentes características termodinámicas da atmosfera, de xeito que coas mesmas situacións sinópticas se poidan acadar temperaturas máis altas.



O obxectivo deste estudo será analizar os diferentes modelos climáticos participantes no cuarto informe de avaliación do IPCC, publicado en 2007, e observar as posibilidades de que as tendencias sinópticas cambien, co consecuente cambio no clima galego.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os resultados dos diferentes modelos participantes no cuarto informe de avaliación do IPCC están á disposición dos investigadores a través do proxecto PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) na páxina web do Lawrence Livermore National Laboratory (www.pcmdi.llnl.gov). Estes modelos proceden de diferentes países e institucións. Así, temos un modelo procedente do Noruega (BCCR-BCM2.0), outro de Canadá (CGCM3.1), así como de Rusia (INM-CM3.0), do Reino Unido (HadCM3), de Alemaña (ECHAM5), ou de Australia (CSIRO-MK3.0). Xapón achega dous modelos (MIROC3.2, MRI-CGCM2.3.2), igual que China (BCC-CM1, FGOALS-g1.0) e Francia (CNRM-CM3, IPSL-CM4), mentres que dos Estados Unidos chegan 4 modelos diferentes (PCM, GFDL, CCSM3, GISS). Por último, tamén participa un modelo resultado da colaboración entre Alemaña e Corea (ECHO-G), facendo un total de 17 modelos climáticos de alta resolución que foron intercomparados entre si a través de diferentes proxectos internacionais.

Os escenarios escollidos neste traballo foron os escenarios B1, A1B e A2, definidos polo IPCC e seleccionados no cuarto informe de avaliación para seren executados por todos os modelos participantes. Estes escenarios representarían baixos aumentos na concentración de gases de efecto invernadoiro para o vindeiro século (B1), aumentos medios (A1B) e grandes aumentos (A2).

Para extraer o sinal NAO existen varias alternativas. Nun primeiro apartado presentaremos a seguida por Stephenson *et al.* (2006), nas que o sinal NAO se obtén directamente da resta das presións en superficie nos Azores e Islandia, e a continuación presentaremos a análise de compoñentes principais no nivel 500hPa para dous modelos diferentes. Neste caso identificaremos a NAO coa primeira compoñente principal, é dicir, coa compoñente que explica máis variabilidade a este nivel.

Ademais disto, presentaremos en dous destes modelos as estatísticas correspondentes á aparición de diferentes tipos de tempo. A obtención do catálogo de tipos de tempo para Galicia explícase no capítulo correspondente ás evidencias actuais do cambio climático en Galicia. Os detalles poden ser consultados en Lorenzo *et al.*, 2008. Cómpre recordar que na segunda metade do século XX non se apreciaban cambios significativos na frecuencia de aparición dos diferentes tipos de tempo, calculados tendo en conta a presión en superficie,

RESULTADOS E DISCUSIÓN

Comezaremos describindo os resultados de todos os modelos para o escenario A1B, posto que este é un escenario intermedio entre o máis pesimista (A2) e o máis optimista (B1) en canto ás concentracións de gases de efecto invernadoiro no vindeiro século. O primeiro que se pode apreciar é que, en xeral, na primeira metade do século os modelos non presentan unha tendencia estatisticamente significativa no sinal NAO. Durante a segunda metade do século a metade dos modelos tende cara á NAO positiva, mentres que a outra metade segue sen apreciar tendencias. Este comportamento mantense de xeito cualitativo nos outros dous escenarios, aínda que no escenario A2 son máis os modelos que presentan tendencias a NAO positivas na segunda metade do século XXI, mentres que no escenario B1, son menos os modelos que presentan esta tendencia, e de forma menos acusada. Na figura 1 represéntase a media móbil a 10 anos do sinal NAO para os diferentes modelos. Na figura 1a, para

o escenario B1, vemos como as tendencias, aínda que significativas, non son moi fortes. Na figura 1b podemos ver a mesma representación no escenario intermedio (A1B). Aquí si que se observan tendencias máis claras, de xeito que nas derradeiras décadas a maior parte dos modelos tende cara a valores positivos da NAO. Este resultado é máis acentuado no escenario A2 (figura 1c). A figura 1d mostra o termo medio da media móbil a dez anos dos modelos utilizados do IPCC neste estudo para os tres escenarios. Nesta figura queda claro como a tendencia media dos modelos é presentar valores positivos da NAO a medida que avance o vindeiro século, sendo a tendencia máis acusada no escenario A2. Esta tendencia cara a valores positivos da NAO terá consecuencias no clima de Galicia. A máis evidente será que aumenten as condicións anticiclónicas en xeral e, polo tanto, poida diminuír a pluviosidade media anual, en liña cos resultados xerais que se están a presentar a nivel global (IPCC, 2007). En canto ás temperaturas, as consecuencias non son tan claras, posto que, como se pon de manifesto no capítulo de evidencias, a correlación entre as temperaturas de Galicia e a NAO non é moi significativa. De calquera forma, como veremos posteriormente, agárdase non só que a NAO estea en valores predominantemente positivos, senón que os centros de acción se vaian movendo cara ao norte, de forma que a parte anticiclónica poderá ter maior influencia sobre Galicia, facilitando posiblemente o aumento das temperaturas na primavera e no verán.

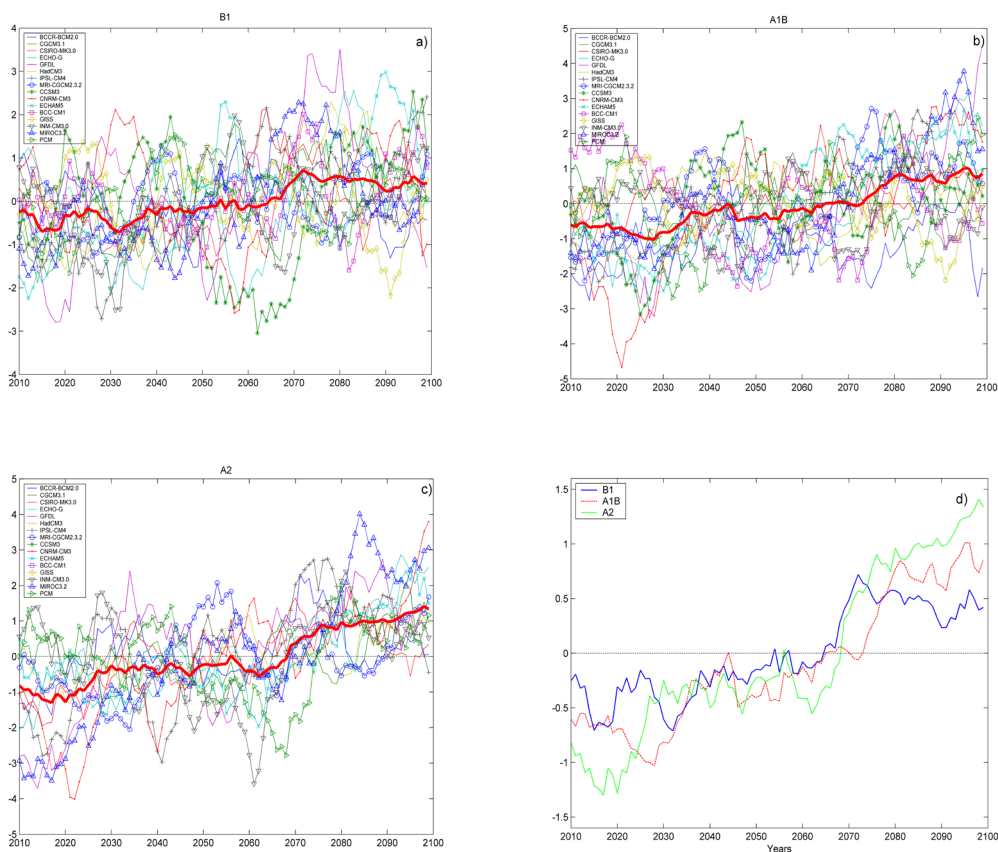


Figura 1: Media móbil a 10 anos de diferentes modelos participantes no 4AR do IPCC para os escenarios B1 (figura 1a), A1B (figura 1b) e A2 (figura 1c). As medias dos valores dos diferentes modelos aparecen representadas na figura 1d.



Na figura 2 móstrase de modo individualizado a evolución do sinal NAO para dous modelos diferentes no escenario A1B. Neste caso escolléronse dous modelos que representan os dous comportamentos típicos. Ou ben os modelos presentan soamente variabilidade decadal, tal como sucede no século XX (caso do modelo ruso INM-CM3.0; figura 2a), ou ben tendencias cara a valores positivos (modelo alemán ECHAM5; figura 2b), establecendo así unha diferenza ocasionada polo cambio climático antropoxénico. Os diferentes resultados obtidos na figura 1 son significativos no sentido de que, se os niveis de gases de efecto invernadoiro non aumentan demasiado (escenario B1), a probabilidade de que a circulación atmosférica a nivel superficial se vexa afectada diminúe, posto que máis modelos presentarán só variabilidade decadal. Polo tanto, neste caso o clima non terá cambios moi bruscos e continuarán a ser dependentes do balance radiativo. Se nos movemos nos escenarios máis pesimistas (A2), a maior parte dos modelos presentarán un comportamento similar ao amosado na figura 2b, mesmo de xeito máis acusado, polo que as probabilidades de que a NAO presente valores positivos na segunda metade do século XXI aumenta notablemente.

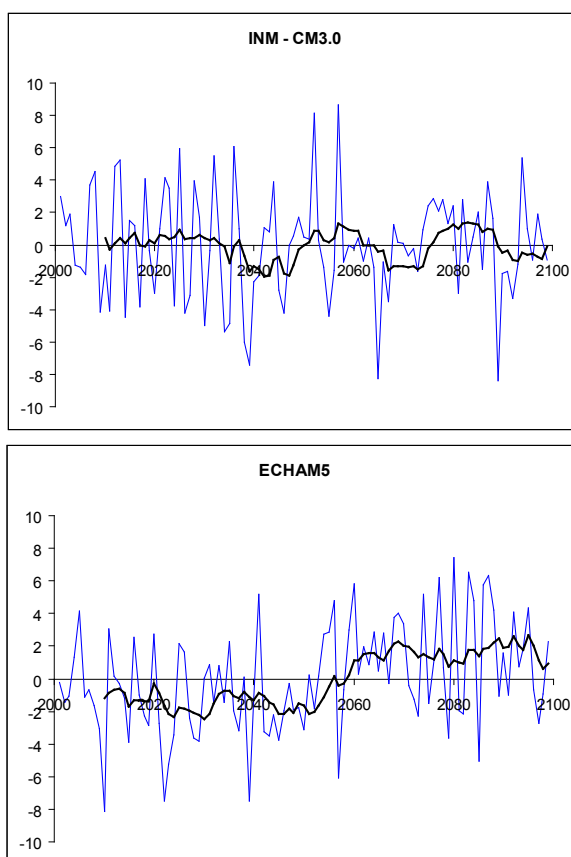


Figura 2: Comportamento medio anual do sinal NAO para dous modelos diferentes actuando baixo o escenario A1B: INM-CM3.0 (figura 2a) e ECHAM5 (figura 2b).

Para estudar os resultados a 500 hPa, centrarémonos por simplicidade no comportamento de dous modelos que representan en superficie diferentes tendencias, ECHAM5 e CNRM-CM3.0. Na figura 3 vemos que nos dous modelos utilizados a primeira compoñente principal tende a aumentar clara-

mente nos tres escenarios, aínda que o fai con máis intensidade no escenario A2. Isto quere dicir que, se definimos a NAO como a primeira compoñente principal a 500hPa, neste caso si que vemos unha tendencia en calquera dos tres escenarios. Isto lévanos a pensar, tendo en conta os resultados presentados para a NAO en superficie, que un escenario moi plausible para o século XXI é o desprazamento dos centros de acción que conforman a NAO. Esta hipótese considerouse en anteriores traballos (Vicente-Serrano e López-Moreno, 2008). As implicacións para o clima de Galicia non están claras, posto que dependerá da nova situación destes centros de acción. Pero o que si se pode dicir é que a definición primitiva da NAO como as diferenzas de presión entre puntos fixos, tales como os Azores e Islandia, feita a principios do pasado século, podería deixar de ser válida ou, polo menos, perder unha parte da variabilidade do fenómeno. No estudo das correlacións entre a NAO e a chuvia en Galicia na segunda metade do século XX comprobamos como estas correlacións cambiaban co tempo dun xeito moi apreciable. Durante décadas a variabilidade da chuvia invernal en Galicia podía ser explicada nunha porcentaxe moi alta pola NAO, mentres que noutras décadas existía un desaxuste entre estes dous fenómenos. Estas diferenzas poden ser explicadas case completamente pola variabilidade solar. Porén, para as vindeiras décadas, e debido ao aumento dos gases de efecto invernadoiro, os centros de acción poden empezar a cambiar de posición, aumentando tamén a variabilidade das correlacións entre a NAO e o clima en Galicia e, por extensión, no resto de Europa.

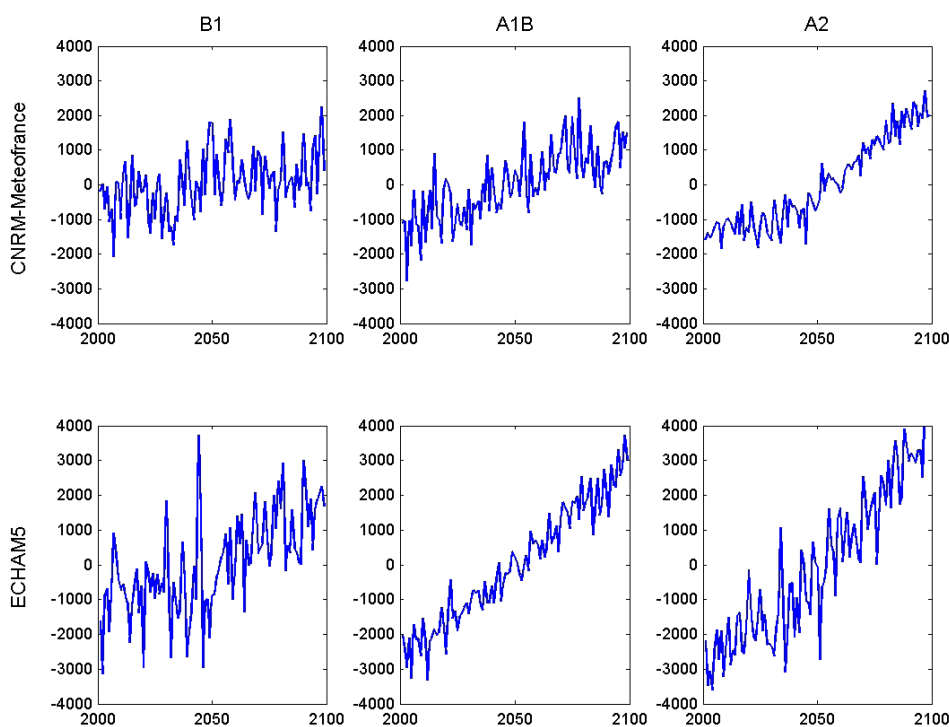


Figura 3: Evolución da primeira compoñente principal na área do Atlántico norte en dous modelos diferentes, CNRM e ECHAM5, baixo tres escenarios diferentes.

A evolución máis probable destes centros de acción é de que se movan cara ao norte ou nordeste. Este desprazamento é consistente na maior parte dos modelos climáticos en altura, aínda que non é tan claro en superficie, onde si se observa a formación de menos borrascas no Atlántico norte



(Lambert e Fyfe, 2006). A implicación máis clara deste movemento sería un desprazamento cara ao norte das borrascas atlánticas e, polo tanto, unha diminución das fronteiras que atravesen Galicia, coa consecuente diminución na cantidade de chuva.

Para estudar as tendencias na clasificación de tipos de tempo, utilizaremos os dous modelos presentados na figura 2. No caso do modelo ECHAM5 (figura 4) para o período 2011-2040 non se observan diferenzas maiores do 5% en ningún dos escenarios. Para o período 2041-2070, no inverno, verán e outono, as diferenzas con respecto do clima actual son tamén menores do 5%. Na primavera os cambios son máis visibles, cun incremento dos tipos anticiclónicos (particularmente para o escenario A1B) e ao mesmo tempo unha diminución dos tipos ciclónicos, do sueste e do oeste.

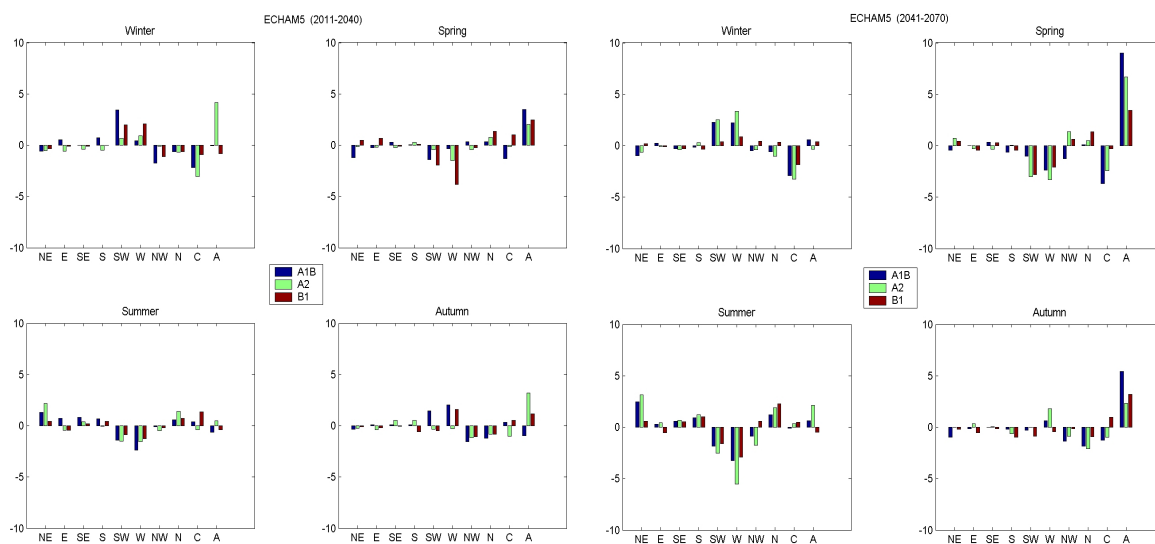


Figura 4: Diferenzas en porcentaxe para o modelo ECHAM5 en dous períodos diferentes (2011-2040) e (2041-2070).

Se temos en conta o modelo INM-CM3 (figura 5), os cambios nas frecuencias de aparición dos diferentes tipos de tempo presentan variabilidades máis apreciáveis que no caso do modelo ECHAM5. Para o período 2011-2040, no inverno vese unha diminución do 10% no tipo de tempo ciclónico, cun incremento nos tipos do suroeste e anticiclónicos, respectivamente. Na primavera unha diminución da frecuencia de aparición dos tipos de tempo ciclónicos vén acompañada dun aumento dos tipos de tempo anticiclónicos. No verán obsérvase un aumento do 15% na frecuencia de aparición dos tipos de tempo do nordés e un 10% nos tipos de tempo do norte. Para o período 2041-2070, obsérvanse cambios importantes na primavera (incremento da frecuencia de aparición dos tipos de tempo anticiclónicos e diminución da dos ciclónicos), e tamén no verán, cun incremento na aparición dos tipos de tempo do nordés e o norte. Os cambios no inverno non son tan apreciáveis desde un punto de vista climático, posto que a diminución da frecuencia de aparición de tipos de tempo ciclónicos leva asociada o aumento na frecuencia de aparición dos tipos de tempo de oeste e suroeste, que teñen características climáticas semellantes.

Polo tanto, vemos como os resultados da frecuencia de aparición dos diferentes tipos de tempo sinópticos, non son moi robustos, posto que da análise dos modelos obtéñense resultados lixeiramente diferentes. Ademais disto, cómpre ter en conta que para a análise dos tipos de tempo sinóptico cómpre utilizar os datos diarios dos modelos. Tal como se explica na introdución, o resultado dos modelos climáticos é significativo cando as medias temporais son suficientemente longas e os períodos diarios quizais non sexan suficientemente longos como para obter estatísticas fiables. De calquera xeito, o aumento dos períodos anticiclónicos practicamente durante todo o ano, pero particularmente visibles e significativos na primavera, está en liña coa posibilidade de que a NAO presente valores positivos e, polo tanto, diminúan as chuvias totais. Tal como sucede coa NAO, as implicacións para a temperatura non están claras, aínda que a maior frecuencia de aparición de anticiclóns primaverais levaría a un aumento das temperaturas.

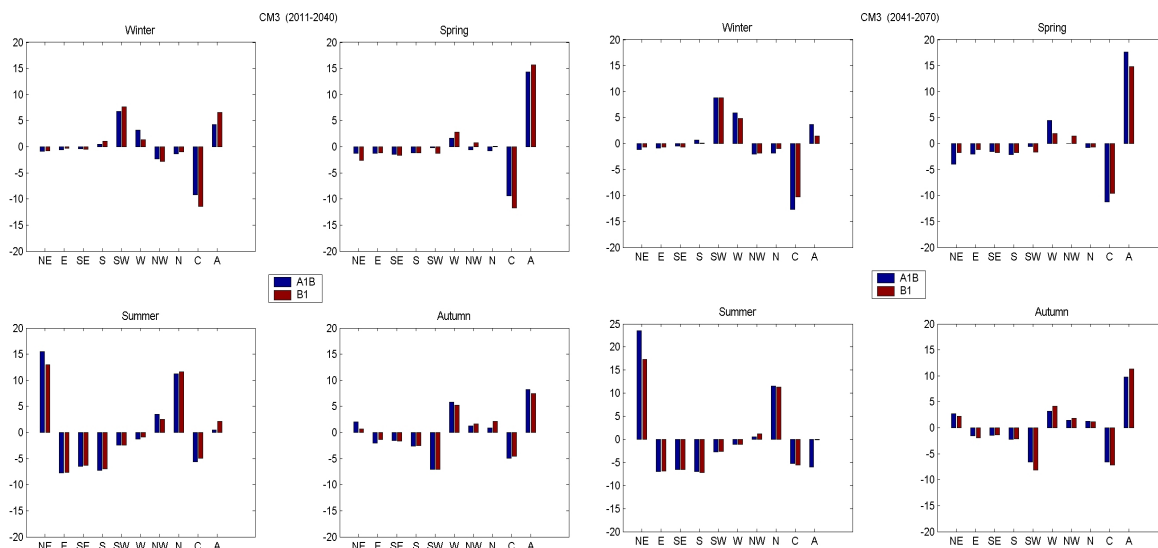


Figura 5: Diferenzas en porcentaxe para o modelo INM-CM3.0 en dous períodos diferentes (2011-2040) e (2041-2070).

CONCLUSIÓN

Neste traballo estudáronse as tendencias sinópticas na área do Atlántico norte. Utilizáronse os diferentes modelos participantes no cuarto informe de avaliación do IPCC, tendo en conta tres escenarios distintos: B1, A1B e A2. O estudo considerou tres aspectos diferentes. Por unha banda, as tendencias presentadas pola NAO en superficie, tal como é definida en anteriores traballos (Stephenson *et al.*, 2006). Tendo en conta esta definición as tendencias da NAO para as vindeiras décadas son moi robustas, posto que o comportamento é moi semellante en todos os modelos. Obsérvase, en xeral, que a tendencia nas vindeiras décadas será cara a valores positivos da NAO. Isto constitúe unha importante diferenza con respecto aos valores das últimas décadas, nos que só se aprecia a variabilidade decadal natural. Pódese comprobar, ademais, que canto máis aumente a concentración de gases de efecto invernadoiro (escenario A2), maiores será os valores positivos da NAO. Por outra banda, se definimos a NAO como a primeira compoñente principal a 500 hPa, obtemos tendencias cara a valores positivos máis claras que en superficie. Se temos en conta o resultado obtido en superficie, estas tendencias máis claras en altura soamente poden querer dicir

que os centros de acción se desprazarán a medida que avancen as vindeiras décadas, polo que as relacións deste modo de variabilidade natural co clima en Galicia serán tamén cambiantes. A evolución máis previsible é dun movemento dos centros de acción cara ao norte, polo que Galicia se verá máis influencia pola parte sur do dipolo NAO, é dicir, polas altas presións. Tomando os dous aspectos en conxunto, as implicacións dun movemento cara ao norte do dipolo NAO e unha tendencia cara a valores positivos deste modo de oscilación atmosférico, as implicacións climáticas basearanse na maior afectación das altas presións en Galicia, coa consecuente diminución das chuvias medias anuais. As implicacións para a temperatura non están tan claras, aínda que, polo menos na primavera e no verán, máis situacións anticiclónicas, coas altas presións reforzadas, irá a favor dun aumento nas temperaturas medias. Por último, se estudamos a frecuencia de aparición dos diferentes tipos de tempo definidos para Galicia, observamos que as tendencias non son tan robustas como no caso da NAO, posiblemente debido á utilización das saídas diarias dos modelos climatolóxicos. En todo caso, si que se observa un aumento na frecuencia de aparición de tipos de tempo anticiclónicos, particularmente na primavera, pero visible tamén no inverno e no outono, de forma que esta tendencia irá en liña coa marcada pola NAO.

AGRADECEMENTOS

Nieves Lorenzo agradece o financiamento do programa Ramón y Cajal e os autores agradécenlle a súa colaboración a Álex Ramos na elaboración dos resultados conducentes ás figura 3 e 4.

BIBLIOGRAFÍA

- DeCastro M., Lorenzo M. N., Taboada J. J., Sarmiento M., Álvarez I. and Gómez-Gesteira M. (2006). Teleconnection patterns influence on precipitation variability and on river flow regimes in the Miño River basin (NW Iberian Peninsula) *Climate Research* **32**, 63-73.
- IPCC (2007). Climate Change. The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge University Press, UK
- Lambert S. J. and Fyfe J. C. (2006). Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise. *Climate Dynamics*, **26**, 713-728.
- Lorenzo M. N. and Taboada J. J. (2005). Influences of atmospheric variability on freshwater input in Galician Rias in winter. *Journal of Atmosphere and Ocean Sciences* **10**(4), 377-387.
- Lorenzo M. N., Taboada J. J. and Gimeno L. (2007). Links between circulation weather types and teleconnection patterns and their influence on precipitation patterns in Galicia (NW Spain). *International Journal of Climatology*, **28**, 1493-1505
- Miller R. L., Schmidt G.A., and Shindell D.T (2006). Forced annular variations in the 20th century Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report models. *J. Geophys. Res.*, **111**, D18101, DOI:10.1029/2005JD006323.
- Osborn T. J. (2004). Simulating the winter North Atlantic Oscillation: the roles of internal variability and greenhouse gas forcing. *Climate Dynamics* **22**, 605-623, DOI:10.1007/s00382-004-0405-1.

- Stephenson D. B., Pavan V., Collins M., Junge M. M., Quadrelli R. And participating CMIP2 modelling groups. (2006). North Atlantic Oscillation Response to Transient Greenhouse Gas Forcing and the Impact on European Winter Climate: A CMIP2 multi-model assessment, *Climate Dynamics*, **27**, 401-420
- Vicente-Serrano S. M. and López-Moreno. J. I. (2008). Nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation, *J. Geophys. Res.*, **113**, D20120, DOI:10.1029/2008JD010382.

