

Episodios térmicos extremos analizados con productos MODIS durante el invierno boreal (2000-2016)

Gomis-Cebolla, J.*, Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A.

¹ *Laboratorio de Procesado de Imágenes (LPI), Parc Científic, Universitat de València, 46980 Paterna, Valencia (España).*

Resumen: El inicio del siglo XXI ha estado caracterizado por un agravamiento de la situación de calentamiento global existente y por una serie de fenómenos meteorológicos extremos a nivel global. En particular, durante la estación invernal se han producido una serie de episodios térmicos extremos en zonas extensas del hemisferio norte. En el presente trabajo estos episodios han sido estudiados analizando la distribución espacial y la evolución temporal de las anomalías térmicas en el período 2001-2016 a partir de productos de Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) del sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Las áreas de estudio consideradas en la presente investigación son ocho regiones situadas en el hemisferio norte. Los resultados obtenidos para los episodios de calentamiento y enfriamiento no presentan una discrepancia importante, no obstante se observa un aumento del área afectada por calentamiento frente al área afectada por enfriamiento.

Palabras clave: Episodios térmicos extremos, temperatura superficie terrestre (TST), MODIS, hemisferio norte, calentamiento global.

Extreme thermal episodes analyzed with MODIS products during the boreal winter (2000-2016)

Abstract: The beginning of the XXI century is characterized by the intensification of the existing global warming situation and for a series of drastic global meteorological events. Particularly, during the winter season a series of extreme temperature episodes affecting large areas of the northern hemisphere have been produced. In this paper, these episodes are studied by analyzing the thermal anomalies spatial distribution and temporal evolution in the period 2001-2016 from Land Surface Temperature (LST) products obtained from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor. The study regions considered in this investigation are eight of the northern hemisphere. The results obtained for the heating and cooling episodes do not reveal an important discrepancy, however, an increase in the area affected by heating versus cooling is observed.

Key words: Extreme temperature episodes, Land Surface Temperature (LST), MODIS, Northern Hemisphere, global warming.

1. Introducción

El inicio del siglo XXI ha estado caracterizado por unas condiciones especialmente cálidas: el decenio 2001-2010 justamente ha sido el más cálido de los que se tiene registro (*World Meteorological*

Organization [WMO], 2013). El año 2015 ha batido récords por ser el más cálido de los que se tienen datos tanto a nivel mundial como a nivel nacional (WMO, 2015). Adicionalmente, este inicio de siglo ha estado caracterizado por una serie de fenómenos meteorológicos extremos

* Autor para la correspondencia: Jose.Gomis@uv.es



Figura 1. Regiones de estudio consideradas en el trabajo: Alaska , Canadá, EEUU, Norte de Europa/Rusia, Mediterráneo/Oriente Medio, Siberia, Asia Central y Este Lejano.

(Coumou y Rahstromf, 2012). En este contexto de calentamiento global, destacan los episodios de frío extremos como el ocurrido durante el invierno de 2009/2010 que afectó tanto a EEUU como al norte de Eurasia. Si bien diferentes estudios apuntan como origen de estos fenómenos al papel de la propia variabilidad natural del sistema climático (Cattiaux *et al.*, 2010, Seager *et al.*, 2010, Wang *et al.*, 2010), actualmente siguen siendo fruto de un intenso debate científico. En una descripción completa no obstante, tampoco podemos olvidar los episodios de calor ocurridos, siendo también relevantes en invierno. En particular, para el propio invierno de 2009/2010 los episodios de calor observados han sido considerados más extremos que los episodios de frío (Guirguis *et al.*, 2011).

Tanto en el estudio del sistema climático como en particular el de los fenómenos extremos es habitual el uso de productos de reanálisis disponibles en grillas climáticas de baja resolución espacial y de series meteorológicas de datos cuya distribución espacial es dispersa. Frente a estas limitaciones, la teledetección se presenta como una fuente de observaciones independiente capaz de permitir la observación de los estados y procesos de la atmósfera, superficie terrestre y océanos a diferentes escalas espacio-temporales (Yang *et al.*, 2013).

Tabla 1. Descripción de los productos MODIS utilizados en este estudio.

	MOD11C3
Cobertura espacial	Global
Resolución espacial	0,05° (proyección geográfica)
Cobertura temporal	marzo 2000-2016
Frecuencia temporal	Mensual
Datasets utilizados	LST_Day_CMG/LST_Night_CMG

En este trabajo se utilizan datos de teledetección obtenidos mediante el sensor MODIS a bordo de la plataforma Terra con el fin de analizar las anomalías de temperatura de la superficie terrestre desde el año 2001 hasta la actualidad. El estudio está centrado en ocho regiones del hemisferio norte, analizando tanto los episodios extremos de frío como los de calor. Con este fin, el trabajo se ha estructurado de la siguiente forma: en primer lugar se describen las imágenes y metodologías de extracción de la información para seguidamente mostrar los resultados obtenidos en el análisis de la evolución temporal de las anomalías de temperatura y su distribución espacial. El trabajo finaliza con las conclusiones más relevantes.

2. Datos y métodos

2.1. Regiones de estudio

En la Figura 1 se presentan las ocho regiones de estudio del hemisferio norte consideradas en la presente investigación. Estas son: Alaska, Canadá, EEUU, Europa/Rusia, Mediterráneo/Oriente Medio, Siberia, Asia Central y Este Lejano. Estas regiones han sido seleccionadas en base al estudio realizado por Guirguis *et al.* (2011).

2.2. Datos de satélite y procesado

El estudio de los episodios térmicos extremos ha sido realizado a partir del análisis de las anomalías térmicas invernales en el hemisferio norte (10N-70N) durante el periodo 2001-2016 haciendo uso de datos MODIS. En la Tabla 1 se resumen las características del producto de temperatura utilizado. Los valores mensuales de temperatura diurna (LST_DAY_CMG) y temperatura nocturna (LST_NIGHT_CMG) han sido promediados con el fin de obtener una temperatura mensual media

diaria. El período de referencia para el cálculo de las anomalías ha sido 2001-2012. La elección de este período ha venido limitada por la disponibilidad temporal de los datos MODIS (Tabla 1).

Las anomalías han sido analizadas de forma estacional. El período invernal considerado ha sido diciembre-enero-febrero (DEF). El procedimiento empleado para el cálculo de los valores de anomalías ha sido el siguiente: en un primer lugar, se han calculado los valores estacionales mediante el promedio simple de los valores mensuales considerados. En un segundo lugar, se han obtenido los valores del período de referencia promediando los valores estacionales previos en el período 2001-2012. Finalmente, las anomalías han sido obtenidas como la resta entre los valores estacionales y los del período de referencia. Las anomalías han sido estandarizadas mediante el cociente entre estas y la desviación estándar del período de referencia.

2.3. Oscilación del ártico/Oscilación del atlántico norte

En el hemisferio norte la temperatura de la superficie, especialmente en invierno, está fuertemente influenciada por los fenómenos climáticos de la oscilación del ártico (AO) y la oscilación del atlántico norte (NAO) (Cohen y Barlow, 2005). Ambos fenómenos están estrechamente relacionados, presentando un patrón de temperatura en superficie muy similar (Thompson y Wallace, 1998). Este patrón está caracterizado por su alternancia entre dos estados o fases: una fase positiva está asociada a condiciones más cálidas en Eurasia y EEUU y en cambio una fase negativa está relacionada con un aumento en el número de irrupciones de aire polar sobre estas regiones, resultando en unas condiciones más frías (Thompson y Wallace, 1998).

Estos fenómenos pueden ser descritos haciendo uso de índices climáticos. En particular, para la presente investigación se han utilizado los valores mensuales de los índices AO y NAO disponibles en el *National Oceanic and Atmospheric Administration's* (NOAA) *Climate Prediction Center* (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>). Los valores han sido promediados para obtener el valor estacional promedio para el invierno.

2.4. Análisis de resultados

El análisis de resultados ha consistido en el estudio de la distribución espacial y evolución temporal de las anomalías térmicas sobre las ocho regiones de estudio consideradas. Para la evolución temporal se han considerado los valores espacialmente promediados sobre las regiones. Adicionalmente, se ha cuantificado el área afectada por calentamiento (anomalías positivas) y por enfriamiento (anomalías negativas) para cada año. Por último, se incluye un breve análisis de la correlación encontrada entre los valores de anomalías térmicas y los valores de los índices AO y NAO.

El nivel de significancia estadística mínimo considerado en el análisis de resultados ha sido de 80% ($p < 0,2$) aunque valores superiores han sido indicados oportunamente. Este nivel hace referencia a valores absolutos de anomalías estandarizadas superiores a 1,28.

3. Resultados

3.1. Análisis de la distribución espacial de las anomalías térmicas

En la Figura 2 se presentan los mapas de anomalías estandarizadas utilizados en el análisis de la distribución espacial de las anomalías. Para el análisis tan sólo los valores de anomalías significativos han sido considerados. En la Figura 2 se recogen los años con los episodios térmicos más destacables. Por completitud se ha considerado la totalidad del hemisferio norte (10N-75N) para la visualización de las anomalías. En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos para las ocho regiones de estudio en el período 2001-2016. Sólo se han considerado en el análisis los valores significativos de anomalías.

En la Figura 2 se observan los siguientes resultados: el DEF 2001 destaca principalmente por un enfriamiento a lo largo de las regiones de Siberia y EEUU y un calentamiento situado en las regiones de Alaska y Europa. En el DEF 2002 destaca el calentamiento situado en el este de EEUU y en el sur de Siberia, así como el enfriamiento situado en la región del Este Lejano. En 2003, destacan principalmente las extensiones de Europa Oriental y noreste de Rusia con un amplio enfriamiento. Adicionalmente las regiones de Alaska y el oeste

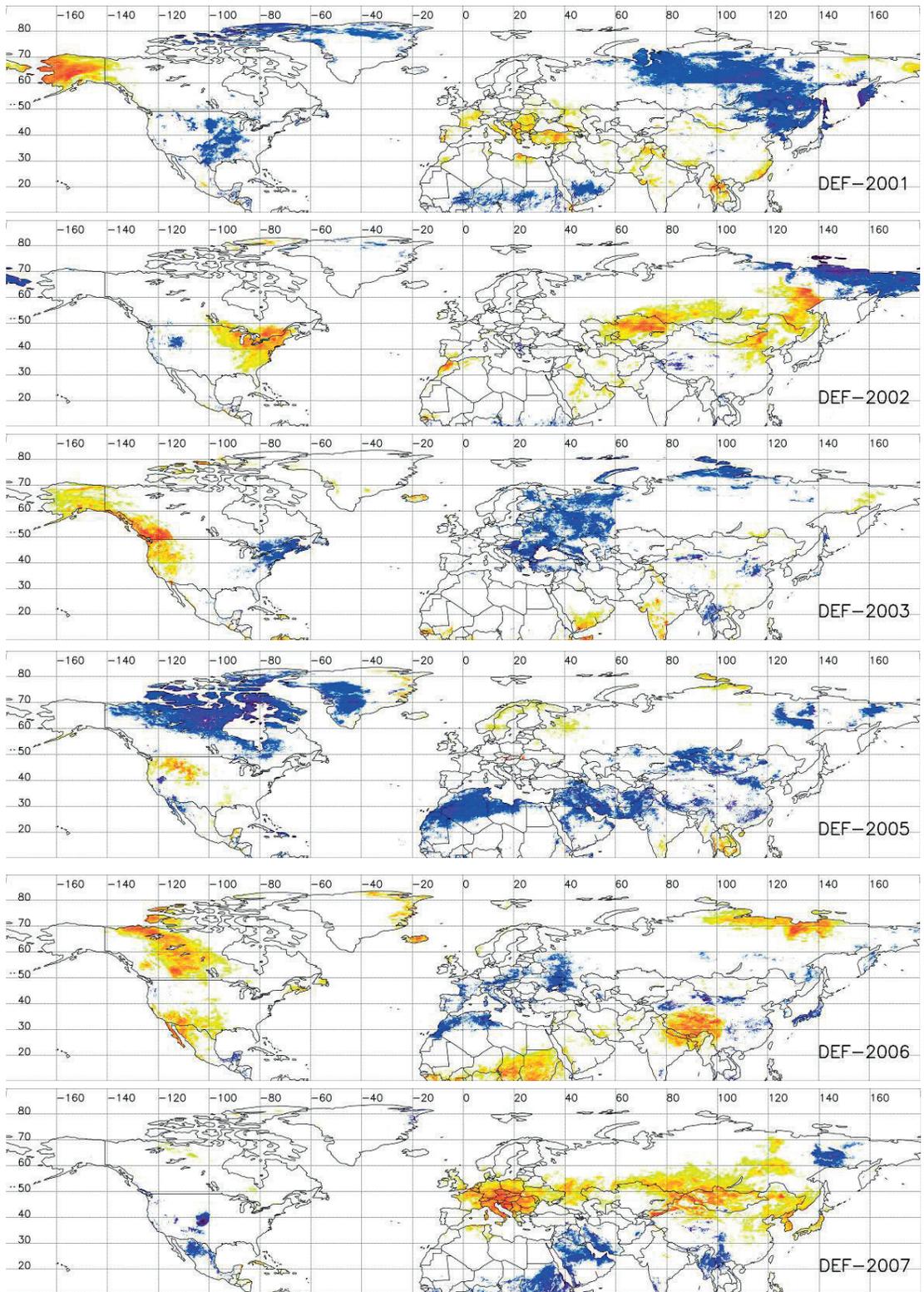


Figura 2. Continúa en la página siguiente

Figura 2. Continúa de la página anterior

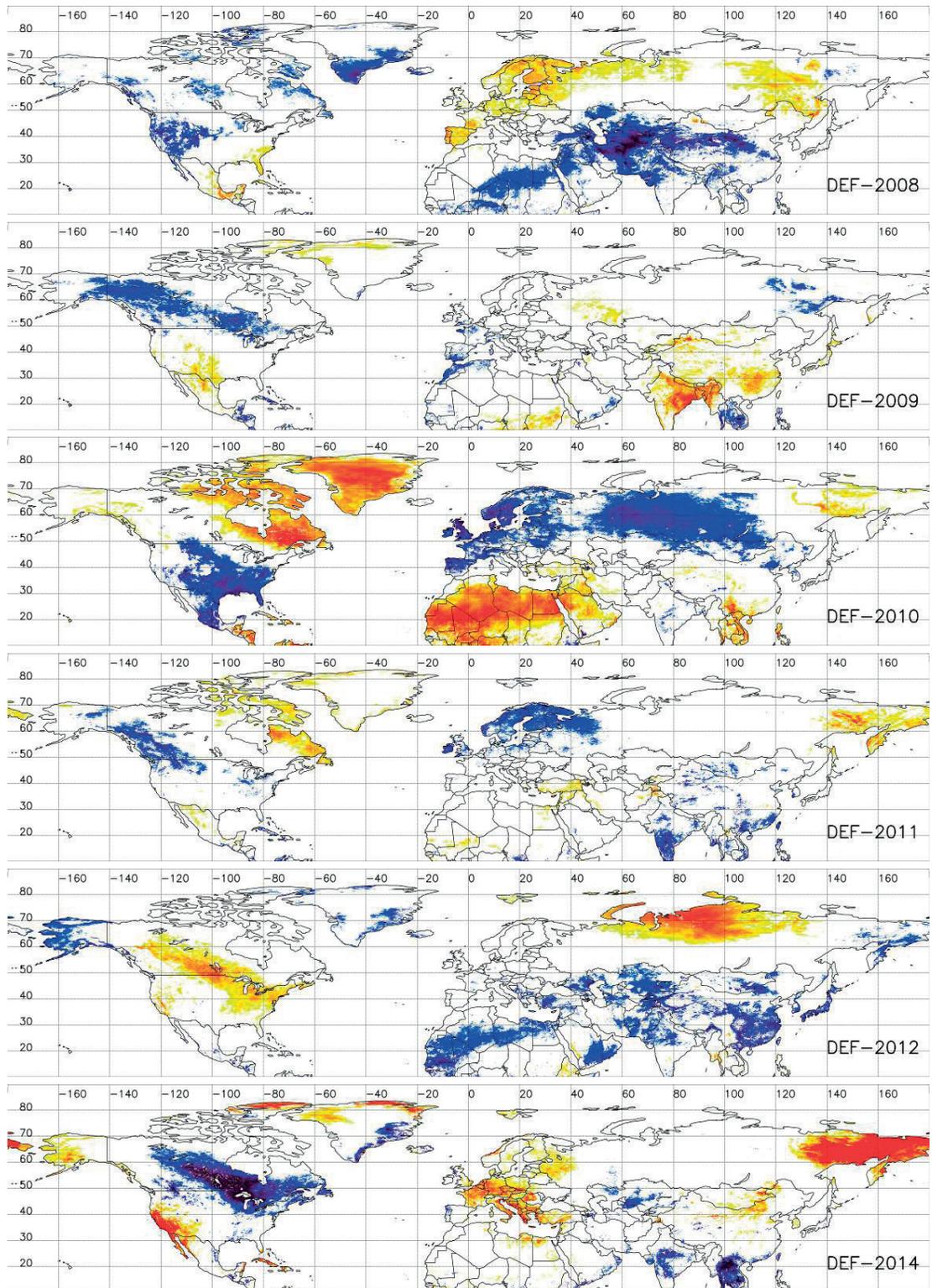


Figura 2. Continúa en la página siguiente

Figura 2. Continúa de la página anterior

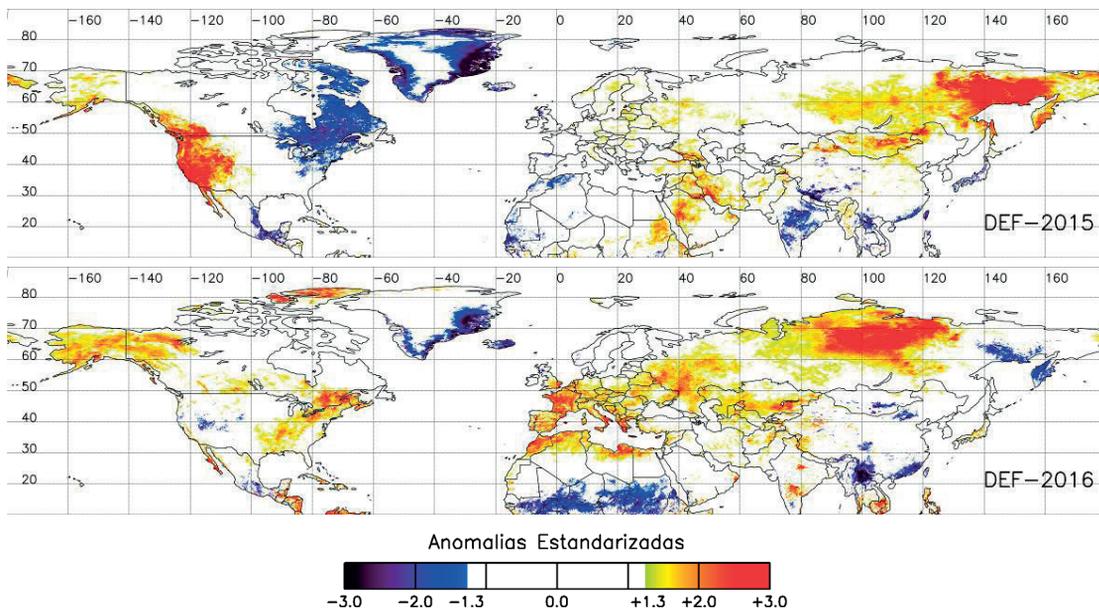


Figura 2. Mapas de anomalías estandarizadas del hemisferio norte correspondientes al periodo diciembre-enero-febrero (DEF) para ciertos años considerados.

de EEUU y Canadá presentan un calentamiento. El DEF 2005 está caracterizado por un enfriamiento distribuido a lo largo de Canadá septentrional, Norte de África, Oriente Medio y Asia Central. En 2006 se observa un enfriamiento situado en Europa y un calentamiento situado en Canadá y EEUU así como en el oeste de China. En 2007, se observa un calentamiento en el norte de Asia

Central y en Europa Central. Para el DEF 2008, el calentamiento se encuentra centrado en la región escandinava. Se observa también un amplio enfriamiento situado al este y oeste de las regiones de Mediterráneo/Oriente Medio y Asia Central, respectivamente. Adicionalmente, para EEUU se observa un enfriamiento. En el caso de 2009, despunta la situación de calentamiento situada en

Tabla 2. Resumen del calentamiento/enfriamiento producido en las regiones de estudio a lo largo del DEF 2001-2016. X hace referencia a calentamiento y O a enfriamiento.

	EEUU	Canadá	N. Eur./ Rusia	Medit./O. Med	Siberia	Asia Central	Alaska	Este Lejano
2001	O	--	--	X	O	--	X	--
2002	X	--	--	--	X	X	--	O
2003	XO	XO	O	O	--	--	X	--
2004	--	--	X	X	--	--	--	--
2005	--	O	--	O	--	O	--	--
2006	X	X	O	O	X	XO	--	--
2007	--	--	X	X	X	XO	--	--
2008	O	O	X	XO	X	O	--	--
2009	--	O	--	--	--	X	O	--
2010	O	X	O	XO	O	--	--	--
2011	--	XO	O	--	--	O	--	X
2012	X	X	--	O	X	O	O	--
2013	--	--	--	--	--	XO	--	--
2014	XO	O	X	X	--	XO	X	X
2015	XO	XO	X	X	X	XO	X	X
2016	X	X	X	X	X	XO	X	--
Total	7X 6O	7X 7O	6X 4O	8X 6O	7X 2O	8X 10O	5X 2O	3X 1O

la zona de India y del suroeste de China. En el DEF 2010 el enfriamiento se distribuye a largo de EEUU, el norte de Europa y Siberia mientras que el calentamiento se distribuye sobre el este de Canadá y Groenlandia y sobre el Sahel en el Norte de África. Respecto del DEF 2011, el enfriamiento destaca en algunas zonas como Escandinavia y zonas del sur de China y de la India. El 2012 se caracteriza por un calentamiento situado en América del Norte y el norte de Siberia y un amplio enfriamiento a lo largo del norte de África, Oriente Medio y Asia Central. En 2014, el calentamiento se encuentra distribuido en Europa y la región del Este Lejano. Para el caso de América del Norte se observa un calentamiento en el suroeste de EEUU y un enfriamiento en Canadá y el noreste de EEUU. En 2015, destaca principalmente el calentamiento situado en la región del Este Lejano y oeste de EEUU. El enfriamiento, en cambio, se encuentra focalizado en el este de Canadá y Groenlandia. Finalmente, en 2016 se observa un calentamiento distribuido ampliamente a lo largo del hemisferio, aunque centrado principalmente en Eurasia, Alaska y el este de América del Norte.

3.2. Análisis de la extensión espacial de las anomalías térmicas

En la Figura 3 se presenta el área del hemisferio norte (en porcentaje) que ha sufrido un calentamiento o enfriamiento durante el período de estudio, así como la línea de tendencia para estas

extensiones. Adicionalmente, se presentan los valores de superficie obtenidos considerando únicamente las anomalías estadísticamente significativas ($p < 0,2$).

En los años 2002, 2004, 2006, 2007, 2009, 2010, 2014, 2015 y 2016 el calentamiento supera al enfriamiento tanto a nivel significativo como no significativo, destacando sobre todo los años 2007, 2015 y 2016 (Figura 3). En cambio, en los años 2001, 2003, 2005, 2008, 2011, 2012 y 2013 el enfriamiento supera al calentamiento tanto a nivel significativo como no significativo, destacando los años 2001 y 2005 (Figura 3). Se observa también cómo las áreas que han sufrido un calentamiento y enfriamiento presentan una tendencia positiva y negativa, respectivamente, en el período de estudio considerado (Figura 3). Este mismo comportamiento viene a reproducirse considerando en el cálculo simplemente los valores significativos, en el caso de calentamiento significativo la tendencia tiene una significancia estadística del 95% ($p < 0,05$) (el análisis no se presenta aquí).

3.3. Evolución temporal de las anomalías térmicas y relación con la oscilación del ártico/oscilación del Atlántico Norte

En la Figura 4 se representa la evolución temporal de las anomalías térmicas estandarizadas, línea más gruesa, sobre las ocho regiones consideradas en el estudio. La variabilidad espacial de los

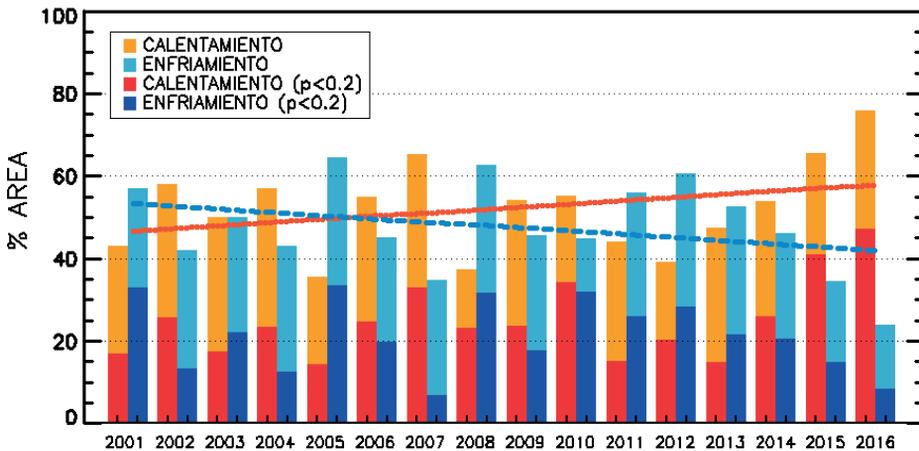


Figura 3. Áreas de las extensiones en el hemisferio norte que presentan un calentamiento/enfriamiento, tanto a nivel general (colores más claros) como a nivel significativo con probabilidades superiores al 80% (colores más oscuros). Adicionalmente, se presenta la línea de tendencia para extensión de calentamiento (línea continua) y enfriamiento (línea discontinua).

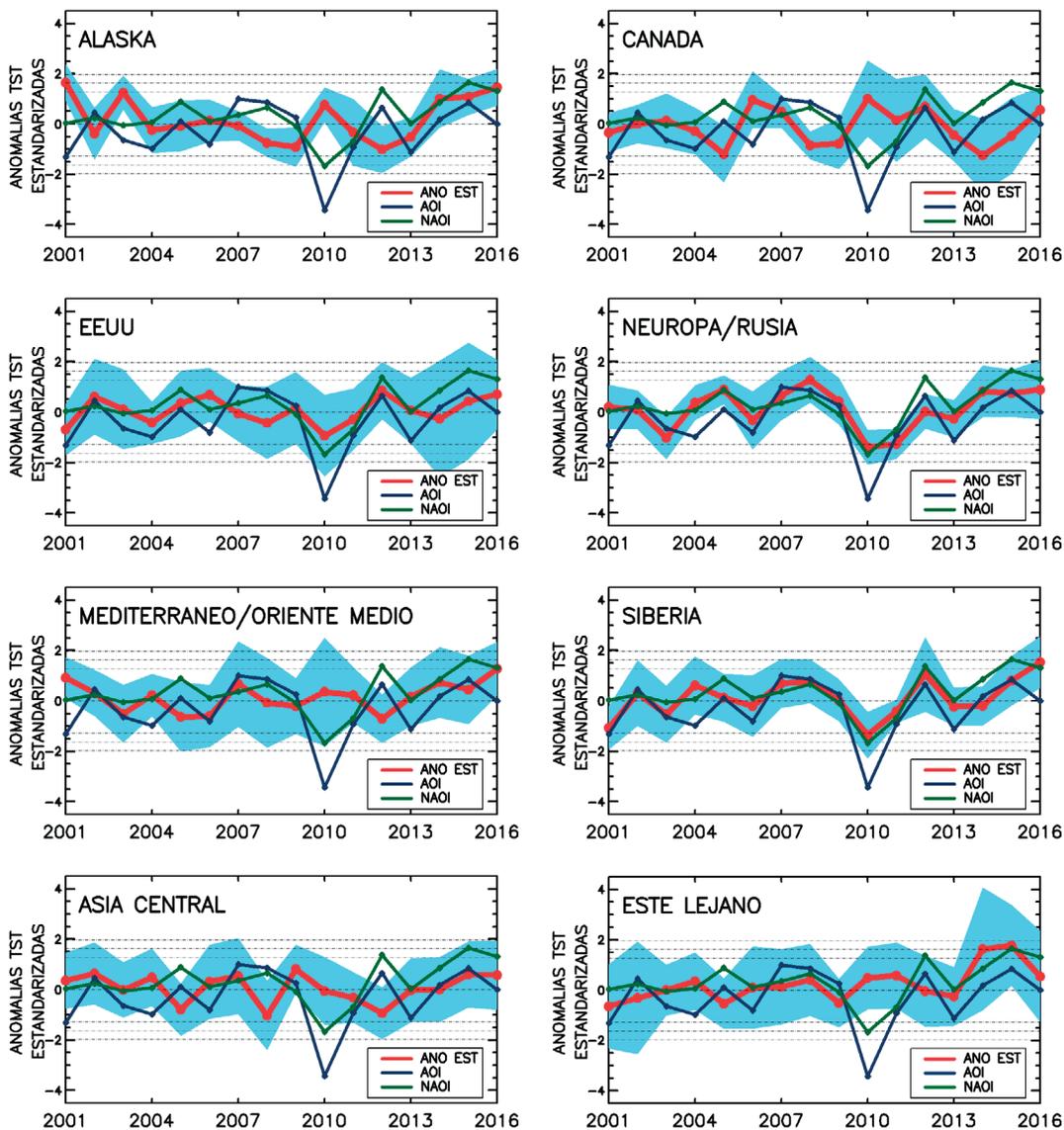


Figura 4. Evolución temporal de las anomalías térmicas estandarizadas sobre las ocho regiones consideradas. La línea roja representa los valores espacialmente promediados y el sombreado la desviación estándar del promedio. Se han indicado en las líneas punteadas los valores correspondientes al 80, 90 y 95% nivel de confianza. Adicionalmente, se presentan los valores de los índices climáticos, AOI en azul, y NAOI en verde.

valores está representada mediante el sombreado. Adicionalmente, se presentan los valores de los índices de la oscilación del Ártico y oscilación del Atlántico Norte (líneas más finas). En la Tabla 3 se presentan los valores del coeficiente de determinación obtenidos a partir del ajuste lineal de los valores de anomalías y de los índices.

Para las diferentes regiones presentadas en la Figura 4, los valores positivos y negativos de

anomalías están asociados con los episodios de calentamiento y enfriamiento resumidos en la Tabla 2. Se destacan, no obstante, los siguientes casos (Figura 4): para Alaska, el calentamiento producido en 2001, 2003 y 2014-2016; este último año con una significancia estadística superior al 80%. Para Canadá, el calentamiento producido en 2006 y 2010 y el enfriamiento ocurrido en 2005 y 2014, siendo estos últimos estadísticamente

Tabla 3. Coeficiente de determinación obtenido a partir de la regresión de las anomalías estandarizadas de temperatura frente a los índices climáticos de la oscilación del Ártico (AO) y oscilación del Atlántico Norte (NAO).

Región	R ² - AO (%)	R ² - NAO (%)
Alaska	29,05	0,25
Canadá	36,32	9,68
EEUU	18,22	41,09
Norte Europa/Rusia	72,60	57,58
Mediterráneo/Oriente Medio	7,61	0,10
Siberia	75,80	61,37
Asia central	3,70	0,72
Este Lejano	13,23	7,97

significativos al 80%. Para EEUU, el calentamiento producido en 2006, 2012 y 2016 y el enfriamiento producido en 2010. Para el Norte de Europa/Rusia el calentamiento en 2007 y 2008, siendo el último estadísticamente significativo al 80% y el calentamiento continuado durante el período 2014-2016. Además del enfriamiento ocurrido en 2003 y 2010-2011, siendo este último período estadísticamente significativo al 80%. Para el Mediterráneo/Oriente Medio, el calentamiento en 2001, 2007 y 2014-2016, siendo este último año estadísticamente significativo al 80% y el enfriamiento ocurrido en 2003, 2005-2006. Para Siberia, el calentamiento producido en 2007-2008, 2012 y 2016, siendo estos dos últimos estadísticamente significativos al 80% y el enfriamiento en 2001 y 2010, este último estadísticamente significativo al 90%. Para Asia Central, el calentamiento producido en 2007 y 2009 y el enfriamiento ocurrido en 2005, 2008 y 2012. Para el Este Lejano, el calentamiento producido en 2014-2015 siendo este período estadísticamente significativo al 90%.

En el caso particular de las regiones de Siberia y Norte de Europa se observa cómo los valores de anomalías térmicas se encuentran relacionados con los fenómenos de la oscilación del Ártico/oscilación del Atlántico Norte (Tabla 3). Este resultado se aprecia también en la Figura 4 en donde los valores de anomalías reproducen mejor el comportamiento de los valores de los índices climáticos.

4. Discusión

De los episodios térmicos extremos detectados (Figura 2 y Figura 4), el enfriamiento observado

a lo largo de la región de Siberia en el DEF 2001 concuerda con la situación de frío intenso y persistente (inicio en noviembre) ocurrida en la región (Waple *et al.*, 2002). Se llegaron a alcanzar hasta valores de temperatura mínima de -60°C durante dos semanas seguidas en el mes de enero (WMO, 2001). En 2002, los Grandes Lagos presentaron un estado de congelación inferior al 10% (Waple y Lawrimore, 2003) resultado que concuerda con la situación de calentamiento observado en la región (Figura 2). En el DEF de 2003 amplias zonas de Europa central y oriental experimentaron episodios de mucho frío. Al noroeste de Rusia las temperaturas llegaron hasta -45°C en enero (WMO, 2003). Este resultado está de acuerdo con la situación de enfriamiento presentada para esta región (Figura 2 y Figura 4). Para el DEF 2005 la amplia situación de enfriamiento repartida entre las regiones de Mediterráneo/Oriente Medio y Asia Central (Figura 2) concuerda con los valores récord de temperatura mínima ocurridos en Marruecos, llegándose hasta -14°C , los sucesos de hipotermia en Afganistán, y el hecho de que este invierno fuera el tercero más frío en China desde 1987 (Shein *et al.*, 2006). En 2006, el enfriamiento observado en Europa (Figura 2) concuerda con las condiciones de frío y alto nivel de acumulación de nieve ocurridas sobre la mayor parte del continente (Pinto *et al.*, 2007). Adicionalmente, Canadá, caracterizada por un amplio calentamiento para este año (Figura 2 y Figura 4), tuvo su invierno más cálido hasta ese momento (WMO, 2006). El DEF de 2007 ha sido definido para Europa como el más cálido en 500 años (Lutenbacher, 2007) concordando con los resultados observados en la Figura 2. En el DEF 2008 el calentamiento situado en la región del Norte de Europa/Rusia (Figura 2 y Figura 4) ha sido asociado con una reducción anómala de la cubierta de nieve en Finlandia (Juga y Tourmenvirta, 2011). Además, el enfriamiento observado en las regiones de Mediterráneo/Oriente Medio y Asia central (Figura 2 y Figura 4) está de acuerdo con la entrada de aire frío registrada en el mes de enero a lo largo de la región que resultó en un nombre incipiente de episodios de frío intensos (Peterson y Baringer, 2009). En el DEF 2009 la región de China, caracterizada por un calentamiento (Figura 2), tuvo el tercer invierno más cálido desde 1951 (Arndt *et al.*, 2010). En 2010 las condiciones de calentamiento y enfriamiento observadas (Figura 2 y Figura 4) han sido

recogidas en diferentes estudios (Cattiaux *et al.*, 2010, Cohen *et al.*, 2010, l'Heureux *et al.*, 2010, Seager *et al.*, 2010, Wang *et al.*, 2010). Respecto del DEF 2011, el área con un enfriamiento extremo no ha sido tan importante como en el DEF 2010 (Guirguis *et al.*, 2011). Sí que destacan, no obstante, algunas zonas como las regiones de Norte de Europa/Rusia y la región de Asia Central (Figura 2). En particular, en esta última región hubo un enero particularmente frío, siendo el más frío en China, Japón y Corea desde 1977, 1986 y 1981, respectivamente (WMO, 2012). En 2014, a pesar del calentamiento observado en EEUU (Figura 2), este DEF en conjunto se sitúa como el tercer más frío desde que se tiene constancia (Blunden y Arndt, 2015). Adicionalmente, el calentamiento observado en Europa (Figura 2) está de acuerdo con los meses de enero con valores récords de temperatura ocurridos en algunos países de la zona, en particular en Francia fue el mes de enero más cálido desde 1900 y en España y Portugal el tercer más cálido desde 1931 y 1961, respectivamente (WMO, 2014). En 2015, en Canadá se registró un promedio de temperaturas elevadas sin precedentes a lo largo de la costa del Pacífico (WMO, 2015) tal y como se puede observar en el calentamiento producido en la región (Figura 2). Finalmente, en 2016 se observa un calentamiento distribuido a lo largo del hemisferio (Figura 2 y Figura 4), en particular para Alaska se trató del segundo invierno más cálido registrado y en EEUU se registró un nuevo valor récord en la temperatura media invernal, 2,6°C por encima del valor promedio del siglo XX (NOAA, 2016).

Respecto del análisis de la relación de los valores de anomalías térmicas con los fenómenos de la oscilación del Ártico/oscilación del Atlántico Norte, los resultados presentados en la Tabla 3 coinciden en cierta medida con la conexión encontrada por Yoo *et al.* (2013) entre la variabilidad térmica de la temperatura troposférica y el fenómeno de la oscilación del ártico utilizando datos MODIS y de reanálisis.

Considerando casos particulares, las características climáticas de los DEF 2007-2008 para la región euroasiática han sido relacionadas con una fase positiva del NAO (Levinson y Lawrimore, 2008, Peterson y Baringer, 2009). Este resultado se puede apreciar en la Figura 4, donde para este período y para las regiones del Norte de Europa/

Rusia y Siberia los valores de anomalías térmicas se superponen con los valores de los índices AO y NAO. Adicionalmente, para 2010 son numerosos los trabajos que destacan los valores negativos del AOI/NAOI como factor determinante en el patrón de temperaturas observado (Figura 2 y Figura 4) (Cattiaux *et al.*, 2010, Cohen *et al.*, 2010, l'Heureux *et al.*, 2010, Seager *et al.*, 2010, Wang *et al.*, 2010). En 2014, el enfriamiento importante en el continente observado en EEUU y Canadá ha sido atribuido a una fase negativa de la oscilación del Pacífico Norte y a la conexión del Pacífico Este (Baxter *et al.*, 2015). Finalmente, el fenómeno del Niño ha sido relacionado con las condiciones de calentamiento observado en EEUU (NOAA, 2016).

5. Conclusiones

En el presente trabajo se han analizado las anomalías térmicas ocurridas en los inviernos recientes haciendo uso de productos de temperatura MODIS. A lo largo del período de estudio se han detectado diferentes episodios de calentamiento y enfriamiento. Si bien las extensiones asociadas a estos fenómenos varían dependiendo del año considerado, se observa una tendencia al aumento del área afectada por calentamiento. Adicionalmente, se ha podido comprobar cómo para ciertas regiones, Norte de Europa y Rusia, los valores de anomalías térmicas están relacionados con los fenómenos de la oscilación del Ártico/oscilación del Atlántico Norte.

A pesar de algunos problemas aún pendientes de resolver en relación al uso de datos de satélite para estudios climáticos, concluimos destacando la utilidad de este tipo de datos para analizar e identificar regiones afectadas por fenómenos extremos, dada su mayor resolución espacial en comparación con otros datos climáticos, como los obtenidos mediante reanálisis.

Agradecimientos

Este estudio ha contado con financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación (CEOS-Sapin2, ESP2014-52955-R) y del Ministerio de Educación Cultura y Deporte a través de la beca FPU14_06502.

Referencias

- Arndt, D. S., Baringer, M. O., Johnson, M. R. 2010. State of the Climate in 2009. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(7), S1–S224. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-91-7-StateoftheClimate>
- Baxter, S., Nigam, S. 2015. Key Role of the North Pacific Oscillation–West Pacific Pattern in Generating the Extreme 2013/14 North American Winter. *Journal of Climate*, 28(20), 8109–8117. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00726.1>
- Blunden, J., Arndt, D. S. 2015. State of the Climate in 2014. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(7), S1–S267. <http://dx.doi.org/10.1175/2015BAMSStateoftheClimate.1>
- Cattiaux, J., Vautard, R., Cassou, C., Yiou, P., Masson-Delmotte, V., Codron, F. 2010. Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate. *Geophysical Research Letters*, 37(20). <http://dx.doi.org/10.1029/2010GL044613>
- Coumou, D., Rahmstorf, S. 2012. A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, 2(7), 491–496. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1452>
- Cohen, J., Barlow, M. 2005. The NAO, the AO, and global warming: How closely related?. *Journal of Climate*, 18(21), 4498–4513. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3530.1>
- Cohen, J., Foster, J., Barlow, M., Saito, K., Jones, J. 2010. Winter 2009/10: a case study of an extreme Arctic Oscillation event. *Geophysical Research Letters*, 37(17). <http://dx.doi.org/10.1029/2010GL044256>
- Guirguis, K., Gershunov, A., Schwartz, R., Bennett, S. 2011. Recent warm and cold daily winter temperature extremes in the Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, 38(17). <http://dx.doi.org/10.1029/2011GL048762>
- Juga, I., Toumenvirta, H. 2011. The impact of anomalous winters on society and the potential use of seasonal forecasts in Finland. En: *11th European Meteorological Society (EMS) Annual Meeting*. Berlin, Germany, 12–16 Setiembre. Vol 8.
- Levinson, D. H., Lawrimore, J. H. 2008. State of the climate in 2007. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(7), S1–S179. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-89-7-StateoftheClimate>
- L’Heureux, M., Butler, A., Bhaskar, J., Kumar, A., Wang, W. 2010. Unusual extremes in the negative phase of the Arctic Oscillation during 2009. *Geophysical Research Letters*, 37(10). <http://dx.doi.org/10.1029/2010GL043338>
- Luterbacher, J., Liniger, M. A., Menzel, A., Estrella, N., Della-Marta, P. M., Pfister, C., Rutishauser, T., Xoplaki, E. 2007. Exceptional European warmth of autumn 2006 and winter 2007: Historical context, the underlying dynamics, and its phenological impacts. *Geophysical Research Letters*, 34(12). <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL029951>
- NOAA. Winter was record warm for the contiguous U.S. *NOAA News and Features*. Último acceso: 14 de abril, 2016, de <http://www.noaa.gov/winter-was-record-warm-contiguous-us>
- Peterson, T. C., Baringer, M. O. 2009. State of the climate in 2008. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8), S1–S196. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-90-8-StateoftheClimate>
- Pinto, J. G., Brücher, T., Fink, A. H., Krüger, A. 2007. Extraordinary snow accumulations over parts of central Europe during the winter of 2005/06 and weather related hazards. *Weather*, 62(1), 16–21. <http://dx.doi.org/10.1002/wea.19>
- Seager, R., Kushnir, Y., Nakamura, J., Ting, M., Naik, N. 2010. Northern Hemisphere winter snow anomalies: ENSO, NAO and the winter of 2009/10. *Geophysical Research Letters*, 37(14). <http://dx.doi.org/10.1029/2010GL043830>
- Shein, K. A., Waple, A. M., Levy, J. M., Bourassa, M. A. 2006. State of the climate in 2005. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(6), S1. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-87-6-shein>
- Thompson, D. W. J., Wallace, J. M. 1998. The Arctic oscillation signature in wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters* 25(9), 1297–1300. <http://dx.doi.org/10.1029/98GL00950>
- Wang, C., Liu, H., Lee, S. K. 2010. The record-breaking cold temperatures during the winter of 2009/2010 in the Northern Hemisphere. *Atmospheric Science Letters*. 11(3), 161–168. <http://dx.doi.org/10.1002/asl.278>
- Waple, A. M., Lawrimore, J. H., Shalpert, M. S., Bell, G. D., Higgins, W., Lyon, B., Menne, M. J., Gleason, K. L., Schnell, R. C., Christy, J. R., Thiaw, W., Wright, W. J., Salinger, M. J., Alexander, L., Stone, R. S., Camargo, S. J. 2002. State of the climate in 2001. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(6), S1. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083%3C0938:CAF%3E2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083%3C0938:CAF%3E2.3.CO;2)
- Waple, A. M., Lawrimore, J. H., Horton, B., Menne, M., 2003. State of the climate in 2002. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(6), S1. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-84-6-Waple>
- WMO. 2001. WMO statement on the status of the global climate in 2001.

- WMO. 2003. WMO statement on the status of the global climate in 2003.
- WMO. 2006. WMO statement on the status of the global climate in 2006.
- WMO. 2012. WMO statement on the status of the global climate in 2012.
- WMO. 2013. WMO 2001-2010 a decade of weather extremes
- WMO. 2014. WMO statement on the status of the global climate in 2014.
- WMO. 2015. WMO statement on the status of the global climate in 2015.
- Yang, J., Gong, P., Fu, R., Zhang, M., Chen, J., Liang, S., Dickinson, R. 2013. The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nature climate change*, 3(10), 875-883. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1908>
- Yoo, J. M., Won, Y. I., Jeong, M. J., Kim, K. M., Shin, D. B., Lee, Y. R., Cho, Y. J. (2013). Intensity of climate variability derived from the satellite and MERRA reanalysis temperatures: AO, ENSO, and QBO. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 95, 15-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2013.01.002>