

**XXXIV Jornadas Científicas de la Asociación Española de
Meteorología (Teruel, 29 febrero - 2 marzo 2016)**
ISBN 978-84-617-5240-9

**Análisis de sensibilidad de la circulación atmosférica a los
forzamientos externos mediante tipos de circulación**

J.A. García-Valero¹, J.P. Montávez², Juan José Gómez Navarro³

(1) Agencia Estatal de Meteorología, Avda. de la Libertad 11, 30071 Guadalupe, Murcia, jugarciav@aemet.es

(2) Dpto. Física, Universidad de Murcia. Campus de Espinardo, Ed. CIOYN, 30071 Murcia, montavez@um.es

(3) Oeschger Centre. Climate change research. Universidad de Berna (Suiza)

1. Introducción

La variabilidad climática sobre una región está condicionada fundamentalmente por dos grandes factores. Uno de ellos es la variabilidad interna del Sistema Climático, resultado de complejas interacciones de carácter no lineal entre sus componentes, mientras que el otro factor lo constituyen los forzamientos de tipo externo. Ejemplos de estos últimos son los cambios en la irradiación solar, en la composición química de la atmósfera, así como las intrusiones bruscas de aerosoles inyectadas a la estratosfera por la actividad volcánica.

Para analizar el papel que los diferentes factores han tenido en la evolución del clima de una región a lo largo del tiempo, es requisito fundamental disponer de series climáticas largas para poder explorar su variabilidad a diferentes escalas temporales, así como de series de forzamientos externos.

Desafortunadamente, la observación instrumental que tuvo auge notable a partir del siglo XIX, es insuficiente para estudios de este tipo, siendo necesario acudir a series climáticas más largas reconstruidas mediante elementos proxy, así como a series derivadas de simulaciones paleoclimáticas llevadas a cabo con modelos climáticos. En el primer caso, las series reconstruidas presentan una señal de ruido muy importante dificultando el análisis de relaciones entre la variabilidad climática y los forzamientos. En el caso de las series simuladas estas son series físicamente consistentes convirtiéndose en una herramienta muy útil para este tipo de análisis.

En el último milenio, diferentes simulaciones

efectuadas sobre Europa indican la existencia de una importante variabilidad climática, así como la notable relación de los forzamientos externos en el desarrollo del período frío conocido como Pequeña Edad de Hielo. Así, alrededor de 1700, las series simuladas (también las reconstruidas para algunas regiones) reflejan un período frío conocido como Mínimo de Maunder, el cuál se relaciona con una baja actividad solar, así como otro período frío entorno a 1800, Mínimo de Dalton, asociado a una gran actividad volcánica.

La relación entre la variabilidad climática de una región y la circulación atmosférica dominante sobre esta región es un hecho claro, por ello, analizar el papel que los forzamientos externos tienen sobre la dinámica atmosférica puede ayudar a entender, en parte, su variabilidad climática. Una forma de caracterizar la circulación atmosférica dominante sobre un área es a través de los Tipos de Circulación (TCs) (García-Valero et al., 2012). Éstos se pueden asimilar como aquellos estados atractores del comportamiento caótico de la dinámica atmosférica en los que se podría resumir todo el conjunto de estados atmosféricos posibles (Lorenz, 1956). La relación entre forzamientos y TCs se podría investigar analizando si los forzamientos favorecen o inhiben la aparición de unos TCs u otros.

Hay muy pocos estudios que han tratado de buscar relaciones entre los forzamientos y los TCs. En Huth et al. (2008) se analiza la relación entre el forzamiento solar y los TCs de la clasificación de Hess-Brezowsky sobre Europa para el período 1949-2003. Los resultados indicaron que en invierno se producía un in-

cremento (descenso) de la frecuencia de los Oestes (Estes) sobre Europa Central durante los períodos de alta (baja) actividad solar. Por otro lado, dentro del proyecto EMULATE (European and North Atlantic daily to MULTidecadal climATE variability), se evaluó el papel del forzamiento antropogénico en los TCs usando para ello simulaciones climáticas con y sin forzamiento antrópico (Knight et al., 2007). Las simulaciones se llevaron a cabo para la segunda mitad del siglo XX y todo el siglo actual. Los resultados de este estudio evidenciaron cambios muy importantes en la frecuencia de los TCs cuando en las simulaciones se consideraba el forzamiento de origen antropogénico, observándose los cambios más relevantes en verano que en cualquier otra estación del año.

El objetivo principal de este estudio consiste en analizar las posibles relaciones existentes entre una serie de forzamientos externos como son los cambios en la irradiancia solar, actividad volcánica y cambios en las concentraciones de CO_2 , sobre la frecuencia de un conjunto serie de TCs obtenidos para una ventana Europea, mediante el empleo de una serie de simulaciones paleoclimáticas. El período de estudio a considerar es toda la segunda mitad del milenio pasado permitiendo un análisis más profundo en comparación a los estudios mencionados anteriormente que usaron TCs. Como novedad de este estudio es que por primera vez se analiza el papel del forzamiento volcánico desde la óptica de los TCs.

Para responder a estos objetivos, este artículo se estructura de la siguiente manera: La Sección 2 muestra la metodología y los datos empleados en este estudio. En la Sección 3 se muestran los resultados de mayor interés. Por último en la Sección 4 se enumeran las principales conclusiones.

2. Datos y Método

2.1. Datos

Para este estudio se han considerado datos diarios de Presión a Nivel del Mar (SLP, en sus siglas en inglés) del período 1500-1990 resultantes de 4 simulaciones paleoclimáticas. Dos de estas paleosimulaciones se llevaron a cabo con el modelo global ECHO-G (Legutke and Voss, 1999), mientras que las otras dos se efectuaron con la versión climática de modelo regional MM5 (Dudhia, 1993), empleándose como condiciones de contorno para su ejecución las dos simulaciones obtenidas del modelo global. Una característica fundamental de las simulaciones globales es que en ambas se emplearon los mismos forzamientos externos (cambios en la irradiancia solar, gases de efecto invernadero y actividad volcánica), difiriendo exclusivamente en las condiciones iniciales de partida Zorita et al. (2005). Así, una de las simulaciones globales, denominada ERIK1, parte de condi-

ciones más frías que la otra simulación denominada ERIK2. Esta característica facilita el estudio del papel de los forzamientos en ambas simulaciones, puesto que al inicializarse cada una de ellas con condiciones distintas, el papel de la variabilidad interna provocará que la evolución climática de cada una de ellas sea diferente, de modo que si el forzamiento externo se impone en algunos períodos a la variabilidad interna, entonces la evolución climática de ambas simulaciones debería ser parecida durante esos períodos de tiempo. Más detalles acerca de estas simulaciones globales, así como de los forzamientos externos considerados en este estudio (Figura 1) pueden encontrarse en Zorita et al. (2005). En cuanto a las simulaciones regionales, sus detalles se describen ampliamente en Gómez-Navarro et al. (2011).

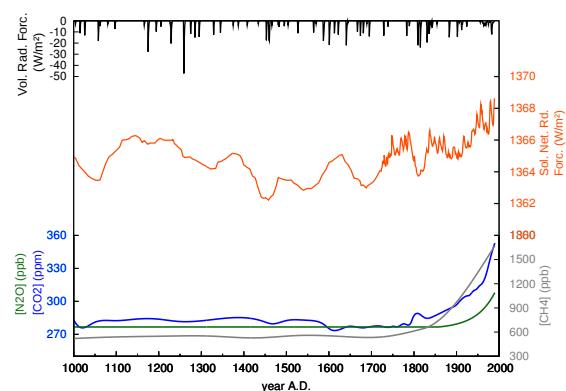


Figura 1. Forzamientos externos usados en las simulaciones paleoclimáticas.

2.2. Obtención de los TCs

Para cada una de las simulaciones paleoclimáticas se ha obtenido una clasificación de TCs en invierno (DEF) y verano (JJA). El método de clasificación considerado utiliza técnicas de clustering previo filtrado de los datos mediante Componentes Principales, el cuál se describe con detalle en García-Valero et al. (2012). En este caso, la clasificación de TCs se desarrolló empleando una ventana Euroatlántica ($[35^{\circ} - 54^{\circ}N]$ y $[19^{\circ}W - 23^{\circ}E]$).

Previo a la obtención de las clasificaciones con el modelo regional, los datos de éste se remapearon a la ventana del modelo global, empleándose para ello una interpolación bilinear. Por otro lado, debido a que durante el largo espacio de tiempo simulado los cambios en temperatura sobre Europa fueron importantes, y para evitar la influencia de la temperatura en los resultados finales, es necesario eliminar o reducir en todo lo posible, la señal de la temperatura en los datos utilizados. Para ello en cada punto grid y para cada instante de tiempo los datos de SLP se normalizaron dividiéndolos por el valor de SLP promediado para toda la ventana geográfica descrita antes.

2.3. Métodos de análisis sobre la influencia de los forzamientos

Una vez obtenidas las clasificaciones de TCs con todas las simulaciones para analizar la influencia de los forzamientos sobre la circulación atmosférica se obtuvieron las correlaciones entre las series de frecuencia de los diferentes TCs y las series de forzamientos. El uso de correlaciones se justifica si se tiene en cuenta lo que se describe a continuación:

Si se considera que la evolución de la frecuencia de los TCs viene determinada por la variabilidad interna y el forzamiento externo, entonces la evolución describirse considerando la siguiente ecuación:

$$\vartheta = \alpha W + f \quad (1)$$

Donde:

T: variable climática; **f**: efecto del forzamiento externo en la variable T; α : constante de proporcionalidad; **W**: variable aleatoria normalizada representando la variabilidad interna (incorelada con el forzamiento).

Entonces si ϑ_i y ϑ_j representan la evolución de la frecuencia de un determinado TC obtenida con dos simulaciones idénticas, ejecutadas con el mismo modelo climático y con las mismas condiciones de forzamiento pero distintas condiciones iniciales. La correlación entre ambas simulaciones, considerando que $\text{Var}(\vartheta_i) = \text{Var}(\vartheta_j)$, se puede demostrar que:

$$\text{cor}(\vartheta_i, \vartheta_j) = \frac{\text{Var}(f)}{\text{Var}(f) + \alpha^2} \quad (2)$$

Y por tanto la correlación se puede usar como medida de la importancia de la variabilidad interna (Zorita et al., 2005; Gómez-Navarro et al., 2011) en la evolución de los TCs. Así, si la evolución de la variable depende fuertemente de la variabilidad interna (α grande), ésta no estará correlada entre los diferentes experimentos. En caso contrario, existirá una correlación positiva significativa, y en ambos experimentos la evolución vendrá determinada por el forzamiento.

De esto modo, se ha analizado la influencia del conjunto de forzamientos utilizados en las simulaciones. No obstante, en nuestro estudio se ha analizado también la existencia de relaciones lineales por separado entre los forzamientos solar, y por cambios en las concentraciones de CO_2 , con las series de frecuencia de los TCs, empleando para ello la correlación. Además de calcularse estas relaciones en todo el período de estudio, en el caso del forzamiento solar se ha analizado también el período 1650-1850, de mayor variabilidad solar (Waple et al., 2002), así como el período 1850-1990 para el caso del forzamiento del CO_2 .

Todas las correlaciones se han obtenido tras filtrar la

variabilidad de alta frecuencia de las series consideradas, empleando para ello una media móvil de 31 años. Para el análisis de la significación estadística de las relaciones se ha empleado el test t-student.

El método seguido para el análisis de la influencia volcánica difiere del que se acaba de describir. En este caso, debido a que el forzamiento volcánico representa una variación brusca en la radiación solar neta, y que el tiempo de vida medio residente en la atmósfera de estos aerosoles es del orden de unos pocos años posteriores a la erupción, cabe esperar que su efecto sobre los TCs sea rápido y de corta duración. Con el fin de resaltar la señal de este forzamiento respecto a la señal impuesta por otros forzamientos o por la propia variabilidad interna, se han considerado sólo aquellos eventos volcánicos con un forzamiento radiativo superior a 10 W/m^2 , identificándose 19 eventos. Para cada uno de estos episodios se analizó el cambio en la frecuencia de los TCs en los 5 años posteriores a la erupción respecto su frecuencia media en los 5 años anteriores. De este modo, para cada TC, se obtuvo una población de cambios que se comparó con la población de cambios obtenida en períodos de 5 años anteriores y posteriores a años en los que no se produjo ninguno de estos grandes eventos. De este modo, se compararon las medias de ambas poblaciones mediante el test de Mann-Whitney, con el fin de determinar el grado de significación de los cambios. Así, se consideró que el TC responde a las erupciones volcánicas si se observa un cambio significativo en el mismo sentido, de aumento o disminución, en las dos simulaciones llevadas a cabo con el mismo modelo climático.

3. Resultados

3.1. TCs sensibles al conjunto del forzamiento externo

Para cada una de las simulaciones paleoclimáticas consideradas se obtuvieron 14 y 10 TCs en invierno y verano, respectivamente, obteniéndose una dinámica atmosférica muy similar en todas las simulaciones (mismos TCs). No obstante, sólo en 2 TCs de invierno y 6 de verano se encontró sensibilidad al forzamiento externo (Figura 2). El mayor número de TCs sensibles en verano que en invierno está en concordancia con los resultados obtenidos en Gómez-Navarro et al. (2010) quienes detectaron una mayor influencia en verano del forzamiento sobre la variabilidad climática de la PI, así como con los resultados de Knight et al. (2007).

En la Figura 2 se representan los TCs sensibles al conjunto de los forzamientos externos indicándose en cada gráfica si esta relación se ha observado en las simulaciones globales (GCM), regionales (RCM) o

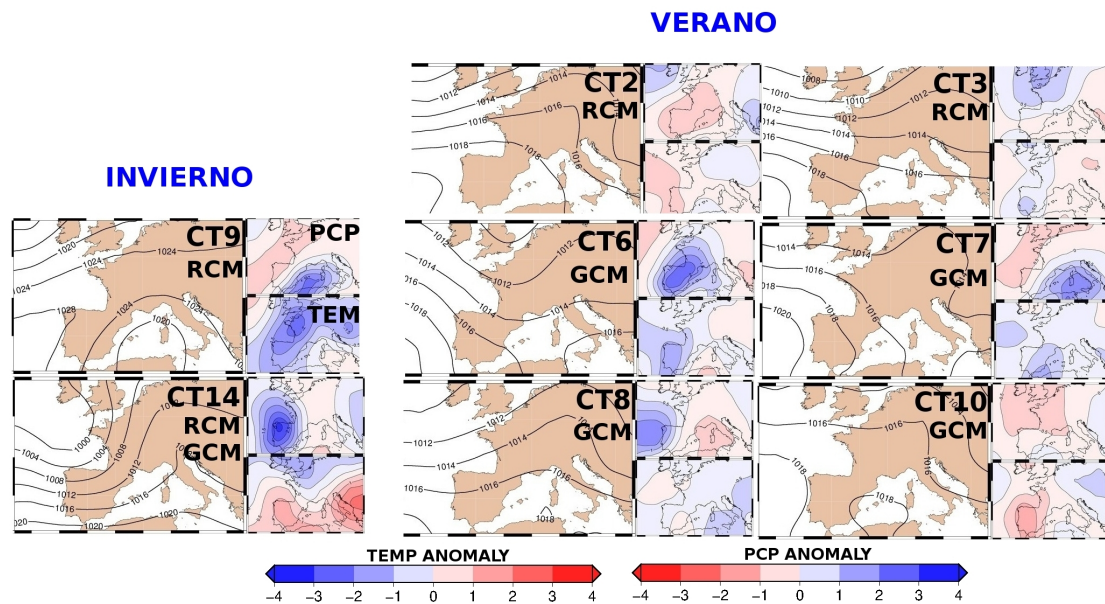


Figura 2. TCs sensibles al conjunto de los forzamientos. Cada TC se representa con sus Tipos de Tiempo, patrones de anomalías, de precipitación y temperatura media. En cada TC se indica además si la sensibilidad del patrón al forzamiento se ha encontrado en las simulaciones del modelo global (GCM) o en el regional (RCM).

en ambas. Además, para cada TC aparece representado también el patrón de anomalías en precipitación y temperatura asociado a estas situaciones sinópticas. En invierno, la Figura 2 muestra que un TC presenta sensibilidad tanto en las simulaciones globales como en las regionales. La situación se corresponde con la presencia de bajas presiones extratropicales al NW de la PI. Esta situación es especialmente interesante pues representa un TC que aparece en otro tipo de clasificaciones sinópticas. Así, en García-Valero et al. (2012) este patrón presenta una fuerte tendencia negativa en el período 1958-2008, y también es especialmente sensible al forzamiento antrópico considerado en los escenarios de Cambio Climático para el presente siglo (Knight et al., 2007).

Por otro lado, el efecto del modelo regional sobre la dinámica atmosférica impuesta por el modelo global queda patente si se tiene en cuenta el mayor número de TCs sensibles obtenido con las simulaciones globales.

3.2. TCs sensibles a los diferentes tipos de forzamiento

En cuanto al análisis por separado de la influencia del forzamiento solar y CO_2 , no se ha obtenido ninguna correlación significativa en el período completo considerado, ni tampoco en los diferentes subperíodos descritos en la Sección 2. No obstante, se han encontrado cambios significativos en la frecuencia de algunos TCs tras intensos episodios volcánicos, especialmente en invierno.

La Figura 3 muestra los tres patrones atmosféricos sensibles a los forzamientos durante el invierno,

así como el signo de cambio en la frecuencia de cada uno de ellos. Como resumen de estos cambios se observa que las situaciones de bloqueo sobre el norte de Europa disminuyen su frecuencia en contra del aumento de la frecuencia de una situación más zonal que advecta hacia estas regiones aire más húmedo y cálido, propiciando anomalías positivas tanto en precipitación como temperatura. Estos cambios van en la línea de los resultados obtenidos en otros trabajos llevados a cabo con reconstrucciones (Zanchettin et al., 2013) y simulaciones paleoclimáticas (Jones et al., 2003). En éstos se destaca la ocurrencia de anomalías positivas en temperatura y precipitación en el Norte de Europa, coincidiendo con un predominio de la fase positiva del patrón de Oscilación del Atlántico Norte (NAO, en sus siglas en inglés).

La influencia volcánica sobre los TCs en verano no es tan clara como en invierno, obteniéndose solamente un patrón afectado (Figura 4). Sus anomalías de temperatura no se corresponden con aquellas obtenidas por medio de reconstrucciones que indican la ocurrencia de veranos más fríos en toda Europa, especialmente en el Norte (Zanchettin et al., 2013). Esta variabilidad reconstruida, según nuestros resultados, no parece estar relacionada con cambios en la frecuencia de situaciones sinópticas, y probablemente se explique mejor si se tiene en cuenta el efecto radiativo de los aerosoles, mayor en esta época del año por la mayor radiación incidente durante esta estación.

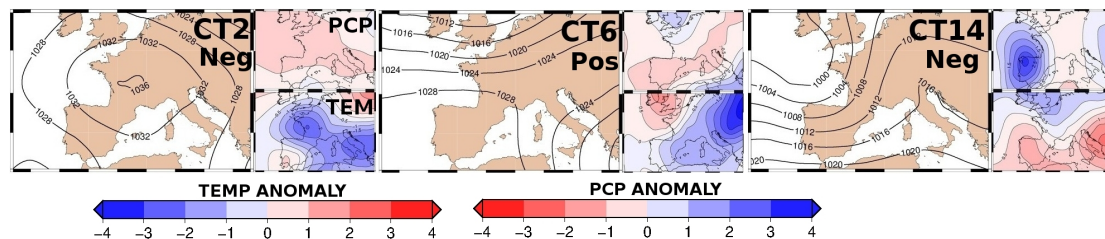


Figura 3. TCs sensibles al forzamiento volcánico en invierno. En cada uno de ellos se indica el signo del cambio en la frecuencia.

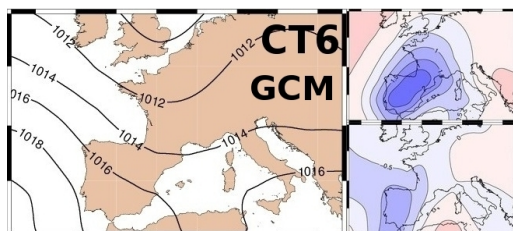


Figura 4. TC sensible al forzamiento volcánico en verano.

4. Resumen y Conclusiones

En este estudio se ha llevado a cabo un análisis de la influencia sobre la dinámica atmosférica de una serie de forzamientos externos: cambios en la irradiación solar en el techo de la atmósfera, cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero y actividad volcánica. Para ello se han empleado los resultados de 4 simulaciones paleoclimáticas útiles para caracterizar la dinámica atmosférica mediante un conjunto de Tipos de Circulación (TCs). El estudio se ha llevado a cabo sobre una ventana euroatlántica, analizándose las estaciones de verano e invierno del período 1500-1990. Este estudio constituye el primer intento de este tipo de análisis mediante el uso de TCs, siendo la primera vez que se analiza la influencia volcánica bajo la óptica de los TCs.

Los principales resultados pueden resumirse de la siguiente manera:

- En invierno y verano se han encontrado relaciones significativas entre el conjunto de los forzamientos y algunos TCs. Observándose un mayor número de TCs sensibles en verano que en invierno.
- No se ha encontrado ninguna relación de la influencia de los forzamientos solar y de CO₂ de forma independiente con los TCs.
- En invierno hay una respuesta significativa de 3 TCs al forzamiento volcánico, señal que es compatible con la prevalencia de la fase positiva de la NAO.
- Las anomalías frías reconstruidas sobre Europa durante los veranos posteriores a una gran erup-

ción, no son compatibles con el cambio de la frecuencia del TC sensible a este forzamiento. Este resultado indicaría que los efectos radiativos provocados por los aerosoles son los que probablemente controlen dichas anomalías.

Referencias

- Dudhia, J.: A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Monthly Weather Review*, 121, 1493–1513, 1993.
- García-Valero, J. A., Montávez, J. P., Jerez, S., Gómez-Navarro, J. J., Lorente-Plazas, R., and Jiménez-Guerrero, P.: A seasonal study of the atmospheric dynamics over the Iberian Peninsula based on circulation types, *Theoretical and Applied Climatology*, 110, 291–310, doi:10.1007/s00704-012-0623-0, URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-012-0623-0>, 2012.
- Gómez-Navarro, J. J., Montávez, J. P., Jiménez-Guerrero, P., Jerez, S., A., G.-V. J., and González-Rouco, J. F.: Warming patterns in regional climate change projections over the Iberian Peninsula, *Meteorologische Zeitschrift*, 19, 275–285, 2010.
- Gómez-Navarro, J. J., Montávez, J. P., Jerez, S., Jiménez-Guerrero, P., Lorente-Plazas, R., González-Rouco, J. F., and Zorita, E.: A regional climate simulation over the Iberian Peninsula for the last millennium, *Climate of the Past*, 7, 451–472, doi:10.5194/cp-7-451-2011, 2011.
- Huth, R., Kyselý, J., Bochníček, J., and Hejda, P.: Solar activity affects the occurrence of synoptic types over Europe, in: *Annales Geophysicae*, vol. 26, pp. 1999–2004, Copernicus GmbH, 2008.
- Jones, P. D., Moberg, A., Osborn, T. J., and Briffa, K. R.: Surface climate responses to explosive volcanic eruptions seen in long European temperature records and mid-to-high latitude tree-ring density around the Northern Hemisphere, *Geophysical monograph*, 139, 239–254, 2003.
- Knight, J., Scaife, A., Fereday, D., Folland, C., and Xoplaki, E.: EMULATE Deliverable D13: Assessment of the relative influence of external forcing

- factors (natural and human) and internal variability and their seasonal differences, Tech. rep., Hadley Center, 2007.
- Legutke, S. and Voss, R.: The Hamburg atmosphere-ocean coupled circulation model ECHO-G, Tech. rep., DKRZ, 1999.
- Lorenz, E. N.: Technical report, Statistical Forecast Project Report 1. Dep.of Meteorology.MIT 49, vol. 1, chap. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction, p. 52, Massachusetts Institute of Technology, 1956.
- Waple, A., Mann, M., and Bradley, R.: Long-term patterns of solar irradiance forcing in model experiments and proxy based surface temperature reconstructions, *Climate Dynamics*, 18, 563–578, 2002.
- Zanchettin, D., Timmreck, C., Bothe, O., Lorenz, S. J., Hegerl, G., Graf, H. F., Luterbacher, J., and Jungclaus, J. H.: Delayed winter warming: A robust decadal response to strong tropical volcanic eruptions?, *Geophysical Research Letters*, 40, 204–209, doi:10.1029/2012GL054403, 2013.
- Zorita, E., González-Rouco, J. F., Von Storch, H., Montávez, J. P., and Valero, F.: Natural and anthropogenic modes of surface temperature variations in the last thousand years, *Geophysical Research Letters*, 32, 2005.