

Tendencias en la probabilidad de tormentas en el Suroeste de Europa

M.D. VALENTÍ PÍA ^{*,1}, L. DE LA TORRE RAMOS ¹, J.A. AÑEL CABANELAS ^{1,2}

¹ *EPhysLab, Facultade de Ciencias, Universidade de Vigo
Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain. * maria.valentipia@gmail.com*

² *Smith School of Enterprise and the Environment,
University of Oxford, Oxford, United Kingdom*

RESUMEN

El estudio de los eventos de precipitación extrema es un tema de gran interés, dado que ayuda a caracterizar el clima y la hidrología de cada región. Su evaluación es también importante para prevenir sucesos que puedan poner en riesgo infraestructuras e incluso vidas humanas. Los índices de estabilidad atmosférica derivados de las observaciones de radiosondas diarias, miden el potencial de desarrollo de tiempo severo y se consideran representativos del medio ambiente a escala sinóptica.

En este estudio utilizaremos el índice K de estabilidad como variable para evaluar posibles cambios en el potencial de tiempo severo. Calcularemos este índice y analizaremos los resultados obtenidos para estaciones de radiosondeo de la Península Ibérica y Francia.

En general, la probabilidad de tormentas convectivas es mayor en las regiones de interior que en las costeras y aumenta por la tarde con la mayor variación diurna también asociada a regiones de interior. Por supuesto, la probabilidad es mayor durante los meses cálidos, con máximos más tardíos en las zonas costeras. Todos estos resultados coinciden con la literatura.

Como resultado original obtenemos que la tendencia en la probabilidad de tormentas convectivas es negativa en prácticamente toda la región de estudio, lo que está relacionado con un aumento de la estabilidad atmosférica en verano durante las últimas décadas en el suroeste de Europa.

Palabras-clave: Pronóstico de tormentas, inestabilidad convectiva, índice K

1 Introducción

La lluvia es fundamental para el desarrollo de la vida sobre la Tierra. A pesar de ser un fenómeno natural y periódico, en algunas ocasiones puede provocar daños considerables que podrían minimizarse con la información adecuada.

Las tormentas convectivas producen algunos de los fenómenos meteorológicos más extremos, como precipitaciones que dan lugar a

inundaciones (con lluvias que pueden alcanzar los 100 mm/h), vientos muy fuertes en superficie (que pueden superar los 50 m/s), granizo (con piedras que pueden superar los 10 cm de diámetro), relámpagos e, incluso, tornados (Holton et al., 2003). La predicción de su ocurrencia a corto plazo y de sus variaciones a largo plazo es, por tanto, muy importante.

Existen diversos factores que afectan a la ocurrencia de tormentas y que debemos tener en cuenta. Sabemos que el océano cambia de temperatura más lentamente

que la superficie continental, debido a que el calor específico del agua tiene un valor elevado en comparación con el calor específico de las demás sustancias existentes en la superficie del planeta. Esto confiere al océano una extraordinaria capacidad para almacenar calor y, por esta razón, puede actuar como un gigantesco moderador del clima (Cifuentes et al., 2003). Así, en áreas continentales las tormentas se presentan al inicio del verano y entre el mediodía y el atardecer, mientras que en las zonas costeras, se desarrollan en medio del verano y suelen ser nocturnas.

Uno de los métodos de predicción de tormentas más utilizado es el cálculo de índices de estabilidad a partir de datos de radiosondeo, ya que miden el potencial de desarrollo de tiempo severo y se consideran representativos del entorno sinóptico (Davis et al., 1997). Para que se desarrolle una tormenta se requiere inestabilidad atmosférica, humedad en el aire y una superficie cálida. Los índices de estabilidad pretenden dar una idea de dichos parámetros en conjunto. Entre los más utilizados están el índice de ascenso (lifted index, (LI)), el índice K, el CAPE (energía potencial disponible para convección (Convective Available Potential Energy)), el índice de Showalter o el índice SWEAT (índice de amenaza de tiempo severo (Severe Weather ThrEAT index)). DeRubertis (2006) estudió las variaciones a largo plazo de los índices anteriormente mencionados, obteniendo como resultado principal el hecho de que para el periodo 1973 – 1997 en EE.UU. el número de días inestables ha aumentado en dos tercios del país y que, por lo tanto, ha aumentado el potencial para el desarrollo de tormentas severas.

En el presente estudio nos basamos en el trabajo de DeRubertis (2006) para analizar la tendencia de la ocurrencia de precipitaciones extremas en el suroeste de Europa. El índice de estabilidad elegido para trabajar en este estudio es

el índice K de estabilidad (George, 1960), que es una medida del potencial de tormenta de una masa de aire. Sirve como predictor de tormentas que producen fuertes lluvias con posibilidad de inundaciones, sin embargo no es un buen indicador de la severidad de una tormenta. Cuando hay mucha humedad en niveles medios y existe una fuerte variación de la temperatura con la altura el índice tendrá valores elevados e indicará gran probabilidad de que se produzca una precipitación intensa. Lo hemos elegido para este trabajo por su sencillez y la disponibilidad de los datos necesarios para su cálculo en la región de estudio a partir de los radiosondeos elegidos.

El artículo se estructura en una primera parte en la que se explica la procedencia de los datos, la forma de calcular el índice K y su relación con la probabilidad de tormentas. A continuación se detalla cómo se realizó la homogeneización de los datos y los métodos usados para realizar los cálculos. Finalmente se presentan los resultados obtenidos y las conclusiones que de ellos se derivan.

2 Datos y método

Los datos utilizados para este trabajo se han extraído del Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA), que es un conjunto de datos de radiosondeos del Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC) de EE.UU. IGRA se compone de registros de sondeos de 1500 estaciones distribuidas globalmente. Los datos están disponibles a través de la página web del NCDC, junto con la información de cada estación (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/igra>).

El archivo es el resultado de la integración de datos de 11 fuentes diferentes y la aplicación de una serie de algoritmos especializados de control de calidad. Las variables disponibles son: tipo de nivel, presión, altura

geopotencial, temperatura, depresión del punto de rocío, dirección del viento y velocidad del viento, aunque los datos con mayor calidad son la temperatura, la altura geopotencial y la presión en superficie en las estaciones con registros relativamente completos en estas variables (Durre et al., 2006).

Utilizamos en nuestro trabajo quince estaciones del suroeste de Europa: A Coruña, Santander, Zaragoza, Madrid, Palma de Mallorca, Murcia, Lajes, Lisboa, Brest, Trappes, Bordeaux, Nimes, Ajaccio, Lyon y Gibraltar (Figura

1). De estas seleccionamos los datos que nos interesan para calcular el índice K, es decir: fecha y hora, presión, temperatura y depresión del punto de rocío. Al leer los archivos de salida vemos que la mayoría de los datos están tomados a las 11, 12, 23, 00 horas UTC, de modo que seleccionamos dos intervalos horarios: 1100-1200 y 2300-0000, correspondientes al final de la mañana y al final de la tarde, respectivamente, para nuestra región de estudio.



FIG 1: Estaciones de radiosondeo seleccionadas sobre la región suroeste de Europa.

2.1 Cálculo del índice K

El índice K (George 1960) sirve como factor de predicción de tormentas eléctricas que producen fuertes lluvias y probables inundaciones repentinas. El valor se calcula a partir de las temperaturas en los niveles de 850, 700 y 500 hPa, y los puntos de rocío en los niveles de 850 y 700 hPa. Cuanto mayor sea la humedad y la diferencia de temperatura entre los niveles de 850 y 500 hPa, mayor será el valor del índice y el potencial de convección.

El cálculo del índice K es relativamente sencillo:

$$K = T_{d850} + (T_{850} - T_{500}) - DD_{700}$$

donde: T_{d850} es la temperatura del punto de rocío, T_{850} la temperatura y DD_{700} la depresión del punto de rocío (diferencia entre T y T_d); el subíndice indica el nivel en hectoPascales del dato.

Esta expresión es válida para estaciones con elevaciones cercanas al nivel del mar, condición que cumplen todas las seleccionadas (Tabla 2).

Como se mencionó anteriormente valores altos del índice implican alta probabilidad de desarrollo de tormentas. La relación con el porcentaje de probabilidad de tormentas se indica en la Tabla 1.

Valor de K	Probabilidad de tormentas (%)
K < 15	0
15 < K < 20	20
21 < K < 25	20-40
26 < K < 30	40-60
31 < K < 35	60-80
36 < K < 40	80-90
K > 40	Cerca de 100

TABLA 1: Probabilidad de tormenta relacionada con los valores del índice K. Para cada intervalo de valores de K tenemos un intervalo de probabilidad de ocurrencia de tormentas. (DeRubertis, 2006).

2.2 Homogeneización

Antes de hacer cualquier análisis a largo plazo, como es el análisis de tendencias, para un conjunto de datos de observaciones debemos comprobar que las series de datos son homogéneas para el período que vamos a considerar. Este paso es necesario porque hay estaciones de radiosondeo en las que la cantidad de datos no es suficiente (o es inexistente) para períodos largos de tiempo, lo que puede dar lugar a resultados irreales.

Para realizar esta homogeneización exigiremos que para cada una de las estaciones se cumpla que tengamos 90 días con los datos necesarios para el cálculo del índice K en cada verano, considerando la estación cálida el período que va de mayo a octubre. La

selección de estos meses se realizó a partir de la distribución mensual del índice K, como explicaremos más adelante.

Como podemos ver en la Tabla 2, en muchos casos el período de datos válidos tras la homogeneización supera los 25 años, mientras que en otros la cantidad final de datos que se pueden utilizar para calcular las tendencias es insuficiente, como en el caso de Lisboa o Zaragoza. Vamos a considerar como períodos válidos para hacer tendencias aquellos que alcanzan, al menos, 15 datos. De esta forma incluimos las estaciones de Palma de Mallorca y Santander, aunque habrá que tener en cuenta que tienen períodos válidos relativamente cortos.

Ciudad (código internacional)	elevación (m)	costa/interior	período válido (1100-1200/2300-0000)	Número de datos válidos (1100-1200 / 2300-0000)
A Coruña (08001)	67	Atlántico	1981-2010 / 1983-2010	30 / 28
Lajes (08508)	54	Atlántico	1975-2006 / 1971-1986	32 / 16
Lisboa (08579)	104	Atlántico	1980-1993 / 1987-1992	14 / 6
Brest (07110)	103	Cantábrico	1971-2010 / 1971-2005	40 / 35
Santander (08023)	64	Cantábrico	1991-2010	20
Ajaccio (07761)	5	Mediterráneo	1979-2010	32
Gibraltar (08495)	3	Mediterráneo	1971-2007	37
Murcia (08430)	54	Mediterráneo	1984-2010 / 1986-2010	27 / 25
Palma de Mallorca (08301)	6	Mediterráneo	1988-2002	15
Bordeaux (07510)	45	Interior	1971-2010	40
Lyon (07481)	201	Interior	1976-2007 / 1979-2005	32 / 27

Madrid (08221)	638	Interior	1980-2010	31
Nimes (07645)	60	Interior	1971-2010	40
Trappes (07145)	168	Interior	1971-2010	40
Zaragoza (08160)	258	Interior	1992-2004	13

TABLA 2: Datos para cada una de las estaciones de radiosondeo: elevación, situación respecto a la costa, período válido (tras la homogeneización) para hacer el análisis de tendencias y número de promedios de verano finalmente utilizados para calcularlas. En las dos últimas columnas, las celdas divididas indican diferencias entre los dos intervalos horarios, con los datos de las 1100-1200 a la izquierda y los de las 2300-0000 a la derecha.

3 Resultados

Esta sección de resultados se divide en tres partes fundamentales: el estudio del promedio del índice K para cada estación, el estudio de la evolución mensual del índice y el análisis de las tendencias de probabilidad de tormentas durante el verano.

3.1 Estudio del promedio del índice K

Si hacemos un análisis del promedio del índice K para los intervalos 1100-1200 UTC y 2300-0000 UTC, obtenemos que para doce de las quince estaciones de estudio existe una mayor probabilidad de tormentas a las 2300-0000 UTC. Únicamente tres estaciones (Ajaccio, Zaragoza y Lajes) tienen una mayor probabilidad de tormentas a las 1100-1200 UTC (Tabla 3). Esto concuerda con el hecho de las tormentas se producen mayoritariamente por la tarde.

Hay que tener en cuenta que para algunas estaciones apenas existe diferencia entre los dos intervalos horarios. Las mayores diferencias se encuentran en estaciones de radiosondeo situadas en zonas de interior, como Zaragoza o Madrid, mientras que la probabilidad de tormentas no parece variar durante el día en algunas ciudades costeras, como A Coruña o Lajes.

Si consideramos ahora la relación entre el promedio anual de K y la situación orográfica de las estaciones, es decir, su localización respecto a la costa (Tabla 2), obtenemos que las ciudades sin costa presentan una mayor probabilidad de tormentas. Ésta disminuye al acercarse al mar, ya que en él se produce un calentamiento mucho más lento que en los continentes. Si nos fijamos en qué mar baña las costas, vemos que las ciudades que se encuentran en la costa

Ciudad	Promedio K 1100-1200	Promedio K 2300-0000
Lyon	17.656	20.988
Madrid	16.508	20.937
Mallorca	17.471	19.576
Nimes	16.602	19.039
Trappes	15.223	17.344
Murcia	11.973	17.225
Ajaccio	18.085	17.187
Bordeaux	15.296	16.234
Zaragoza	21.341	15.417
Santander	10.645	14.593
Brest	11.308	12.259
Lajes	9.706	9.296
A Coruña	8.359	8.818
Lisboa	3.711	6.589
Gibraltar	7.489	8.255

TABLA 3. En esta tabla se muestra el promedio del índice K de cada una de las estaciones de estudio para los diferentes intervalos horarios.

Mediterránea tienen mayor probabilidad de tormentas que las ciudades en la costa Cantábrica, y estas a su vez, tienen mayor probabilidad de tormentas que las ciudades que se encuentran en la costa Atlántica. Este hecho es consistente con el conocimiento de que el Mar Mediterráneo a finales de verano se encuentra a mayor temperatura que el Mar Cantábrico y que el Océano Atlántico.

El caso de Gibraltar es peculiar, ya que se encuentra en la costa Mediterránea pero tan solo dista 32 km del Océano Atlántico. En el estrecho de Gibraltar existe un importante intercambio de aguas, de tal modo que las aguas atlánticas entran en el Mediterráneo en superficie, y las del Mediterráneo salen en profundidad (Peixoto y Oort, 1992).

3.2 Evolución mensual del índice K

Para observar la distribución intraanual del índice K nos interesa dividir la serie según los intervalos que marcan la probabilidad de tormentas de la Tabla 1

y calcular los porcentajes de repetición ya que no siempre tendremos todos los datos.

Si comparamos los porcentajes de cada intervalo para cada mes del año, vemos que los meses con mayor probabilidad de tormentas son mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre (que denominaremos meses de verano para nuestros cálculos) ya que tienen un número importante de días con un índice $K \geq 26$ (probabilidad de tormentas superior al 40%). Esto coincide con el hecho de que en verano la tierra se calienta más produciéndose de esta forma más tormentas. Para valores inferiores de K se obtienen porcentajes elevados durante todo el año (aunque menores en verano por el aumento del número de días con K alto).

Es evidente que en las áreas continentales las tormentas se producen a principios de verano, mientras que en las zonas con costa se producen a mitad del verano o incluso a finales (Tabla 4).

Serie de datos	Mes con máximo porcentaje de $K \geq 26$	
	1100-1200 / 2300-0000	Costa
Lyon	Agosto (33.48% / 44.30%)	no
Madrid	Junio (28.18% / 42.42%)	no
Palma de Mallorca	Septiembre (28.41%) / Agosto (30.65%)	mediterránea
Nimes	Agosto(30.60% / 39.70%)	no
Trappes	Julio(32.21% / 23.21%)	no
Murcia	Septiembre (17.33% / 31.75%)	mediterránea
Ajaccio	Agosto(32.38% / 28.71%)	mediterránea
Bordeaux	Agosto(28.41% / 32.68%)	no
Zaragoza	Agosto (28.94% / 54.45%)	no
Santander	Septiembre (17.64%)/ Agosto (32.78%)	cantábrica
Brest	Agosto(16.05%) / Julio (18.73%)	cantábrica
Lajes	Septiembre (17.32% / 19.69%)	atlántica
A Coruña	Octubre(17.04% / 19.29%)	atlántica
Lisboa	Octubre (11.85% / 43.00%)	atlántica
Gibraltar	Octubre (19.08% / 18.26%)	mediterránea

TABLA 4. Mes cuyo porcentaje de datos es mayor en cada uno de los intervalos horarios. A la derecha se especifica si la estación tiene costa o no y, en caso de tenerla cuál es.

3.3 Estudio de las tendencias del índice K durante el verano

Para tener un mejor conocimiento del comportamiento del índice K, es decir, ver si en los últimos años ha aumentado o disminuido la probabilidad de

tormentas, calcularemos el promedio del índice K para cada verano para los períodos que han pasado el criterio de homogeneización (Tabla 2) y la tendencia, mediante mínimos cuadrados de estos datos.

Obtenemos que la tendencia es negativa excepto en Lajes (+0.8 por década a las 1100-1200 y +1.3 por década a las 2300-0000) y Santander y Murcia, donde se produce un cambio en el signo de la tendencia y es positiva por la tarde (+0.4 por década y +0.6 por década. respectivamente. a las 2300-0000). El caso de Lajes es especial al encontrarse relativamente alejado del resto de las estaciones y en el área en la que se suele situar el anticiclón de las Azores.

En casi la mitad de las estaciones el valor absoluto de la tendencia es superior a 1 por década. Los mayores valores de tendencia se encuentran en

Palma de Mallorca y Gibraltar con tendencias negativas superiores a 2 por década, lo que implica una disminución de más de un 20% en la probabilidad de tormentas cada 20 años aunque en el caso de Palma de Mallorca el período utilizado (15 años) es muy corto y el valor tan elevado de la tendencia puede deberse sólo a este hecho.

En Lisboa y Zaragoza el número de datos disponible es demasiado bajo para considerar los resultados fiables.

Aunque hay que ser precavidos a la hora de interpretar estos resultados, tanto porque los períodos válidos difieren entre las estaciones de radiosondeo como porque algunos son relativamente cortos todo parece indicar que en el suroeste de Europa ha aumentado la estabilidad durante el verano en las últimas décadas.

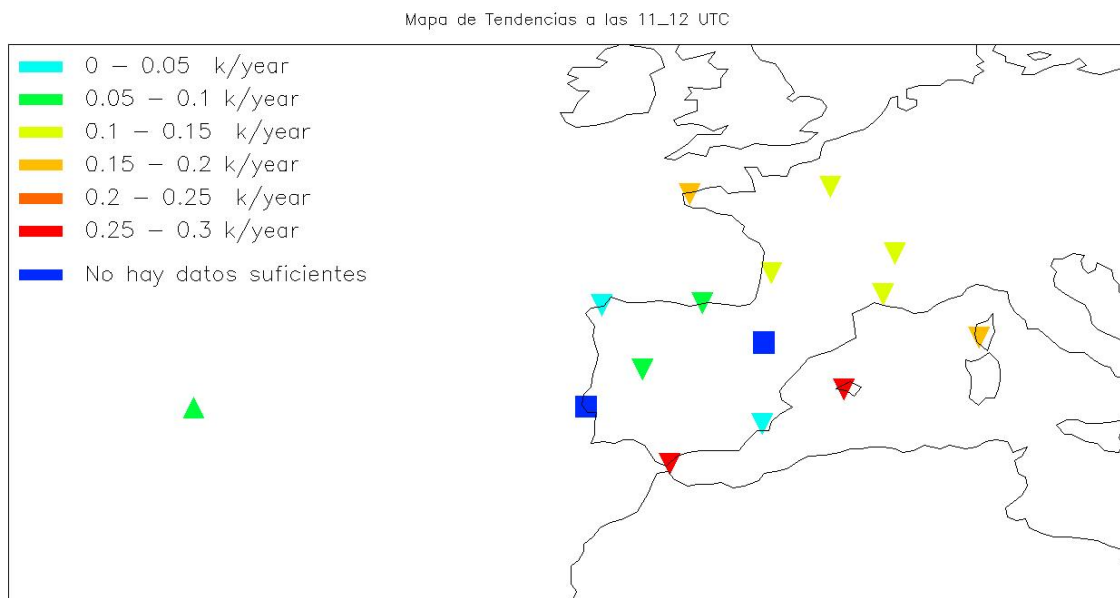


FIG. 2. Tendencias en verano para las diferentes estaciones de estudio para el intervalo horario 11:00-12:00 UTC. Los valores de las tendencias en la barra de colores vienen dados en valor absoluto. Mediante la orientación de los triángulos conoceremos si se trata de una tendencia positiva (triángulo derecho) negativa (triángulo invertido) o no hay tendencia (cuadrado).

6 Conclusiones

Dada la importancia del conocimiento de los eventos extremos de precipitación hemos trabajado con datos de radiosondeo y con el índice K de

inestabilidad para estudiar la tendencia de la probabilidad de tormentas en el suroeste de Europa para el periodo 1971-2010.

Hemos trabajado con el índice K por la sencillez de su cálculo y la relación

directa de su magnitud con la probabilidad de tormentas asociadas a fuertes lluvias (Tabla 1.)

De este trabajo podemos concluir que la tendencia en la probabilidad de tormentas en el suroeste de Europa es mayoritariamente negativa, es decir la estabilidad atmosférica en verano ha aumentado, en general durante las últimas décadas. Este resultado concuerda con los resultados obtenidos

por Lolis (2007) a partir de datos de reanálisis para la región mediterránea.

El trabajo de DeRubertis (2006) concluye que para el período de 1973-1997 en Estados Unidos el potencial para el desarrollo de tormentas severas ha aumentado lo que parece indicar que en el suroeste de Europa el índice K evoluciona de forma opuesta a cómo evoluciona en EEUU.

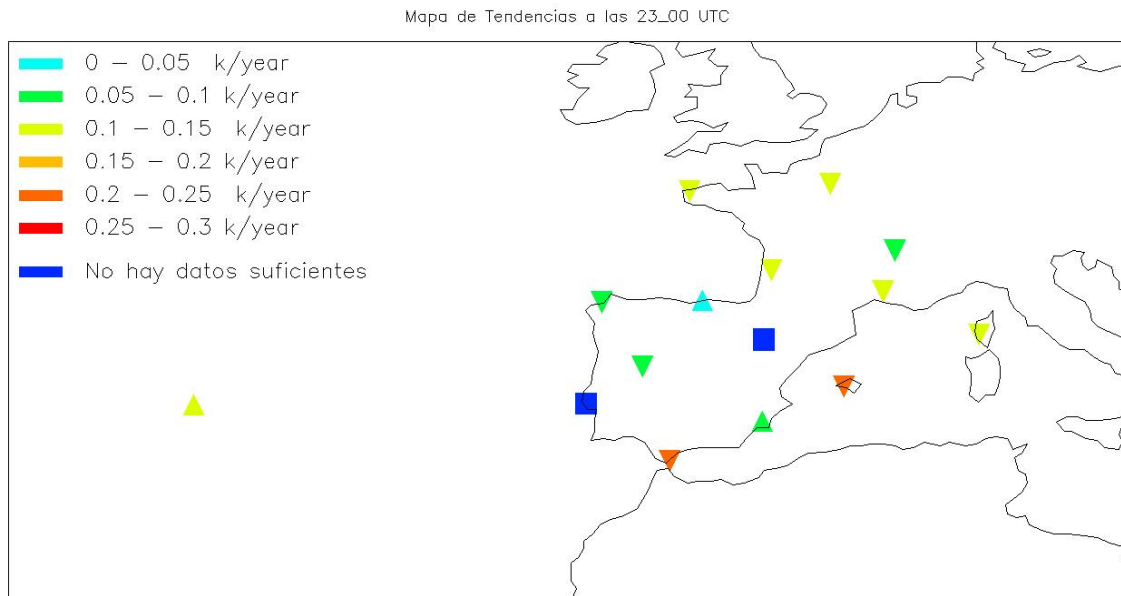


FIG. 3: Igual que la figura 2. pero para las 23:00-00:00

Referencias

- Davis. R.E., T.M. Stanmeyer y G.V. Jones. 1997: A synoptic climatology of tornadoes in Virginia. *Physical Geography*, 18. 383-407.
- DeRubertis. D., 2006: Recent Trends in Four Common Stability Indices Derived from U.S. Radiosonde Observations. *Journal of Climate*, 19: 309-323.
- Durre. I., R.S.Vose y D.B. Wuertz. 2006: Overview of the Integrated Global Radiosonde Archive. *Journal of Climate*. 19: 53-68.
- Cifuentes. J.L., P. Torres-García y M. Frías. 2003: El océano y sus recursos III. Las ciencias del mar: oceanografía física. matemáticas e ingeniería. Fondo de cultura económica. Méjico. 164 pp.
- George. J.J., 1960: Weather and forecasting for Aeronautics. Academic Press, 673 pp.
- Holton. J.M., J.A. Curry y J.A. Pyle, 2003: Encyclopedia of atmospheric sciences. Academic Press, 2780 pp.
- Lolis. C.J., 2007. Climatic features of atmospheric stability in the mediterranean region (1948-2006): spatial modes, inter-monthly and inter-annual variability. *Meteorol. Appl.*14:361-379.
- Peixoto. J. y A.H. Oort. 1992. Physics of Climate. Springer-Verlag New York. Inc. 520 pp.