

LOS NIVELES DE LA ACTIVIDAD ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA EN ESPAÑA

Francisco Pérez Puebla y César Zancajo Rodríguez
AEMET, fperez@inm.es, cesarzan@inm.es

Las consecuencias de las tormentas constituyen la principal adversidad meteorológica que amenaza la seguridad de las personas, y la integridad de sus bienes así como el patrimonio natural y las infraestructuras de la sociedad. El aviso temprano sobre la detección de fenómenos eléctricos atmosféricos tiene una indudable importancia para la seguridad de las personas y para la sintonización de los sistemas de protección ciudadana y de gestión de las infraestructuras vulnerables.

En esta contribución se describen resumidamente algunos resultados de los estudios estadísticos interanuales realizados por los autores para obtener unos umbrales según los niveles de actividad eléctrica característicos de cada lugar así como su variación a lo largo del año. Se aplican los resultados para la graduación de la actividad eléctrica observada en tiempo real adaptando la definición oficial de los niveles de riesgo para la valoración de la observación horaria del periodo de tormenta de acuerdo al comportamiento estadístico específico en cada provincia, isla y zona marítima.

Este es el primer procedimiento objetivo destinado a la clasificación local en intensidad de cada día de tormenta basado exclusivamente en su capacidad horaria para la producción de descargas eléctricas entre nube y tierra respecto a los registros históricos de la red de descargas eléctricas del INM.

Así mismo, se pone de manifiesto la aplicación inmediata de este trabajo para la adaptación del Sistema de Aviso por Impacto de Rayos (SAPIR) incorporando los niveles de actividad eléctrica resultantes de la evaluación estadística para el establecimiento de criterios de emisión de avisos totalmente automáticos que pongan en conocimiento de las autoridades y gestores de infraestructuras el nivel de riesgo eléctrico atmosférico alcanzado en el mismo instante de aparición del fenómeno o de superarse los niveles históricos locales.

Consideraciones sobre los datos

Los resultados presentados en esta contribución se han obtenido a partir de los datos de descargas eléctricas que durante el periodo de ocho años, desde el año 2000 al 2007, ambos inclusive, se han registrado con la red del Instituto Nacional de Meteorología. Esta red comenzó a actuar

operacionalmente desde el año 1992 pero aquí sólo se han considerado las observaciones posteriores al año 2000 en aras a una homogeneidad suficiente tanto en el fenómeno observado como en los sistemas utilizados para su detección y localización.

Los sistemas de radiodetección operativos en 1992 se basaban en las técnicas de la radiogoniometría para la determinación magnética de la dirección de procedencia de la primera descarga de cada rayo entendiéndose entonces como tal aquel fenómeno electromagnético cuya duración era inferior a un segundo y que podía ser observado en un ángulo de $2,5^\circ$ respecto al pulso electromagnético inicialmente identificado. Estos sistemas de seguimiento de la actividad eléctrica de las tormentas proporcionaban unas características de calidad notables sobre el fenómeno observado que no era otro que la primera descarga del conjunto que compone cada rayo. La eficiencia real del sistema se situaba alrededor del 70% de los sucesos y la precisión media de la localización era de pocos kilómetros.

A partir de 1999 se fueron sustituyendo los radiogoniómetros por otros sistemas que incorporaban la tecnología GPS y que proporcionaban unas prestaciones muy superiores a sus predecesores. En primer lugar, se consiguió que el fenómeno observable fuese cada una de las descargas constituyentes del rayo que alcanzaban el suelo y también un porcentaje significativo de las descargas internas en las nubes (descargas intranube) aunque desde el principio se taró el sistema para que rechazase estas últimas despreciando su contribución a la descripción del fenómeno eléctrico atmosférico. Así mismo, se consiguió un aumento de la capacidad de proceso de los sistemas de detección lo que determinó un incremento de la eficiencia de la detección de rayos hasta alrededor del 90% en el interior peninsular y gracias a la tecnología GPS se redujo el error de posicionamiento incluso por debajo del kilómetro en las zonas con mejor cobertura y disponibilidad.

El conjunto de datos que supera las exigencias de homogeneidad aquí planteadas está constituido en su mayor parte los registrados con posterioridad al uno de enero del 2000. Aunque esta afirmación no significa que haya habido durante todo este periodo una homogeneidad constante, absoluta y uniforme por diversos motivos que pasamos a exponer.

La primera razón de debilidad en la homogeneidad de la serie considerada es la derivada de la coexistencia durante los primeros años de datos procedentes de estaciones de distinta tecnología: radiogoniómetros y GPS. Esto fue consecuencia de un largo proceso de migración de los sistemas angulares iniciales para incorporarles la tecnología GPS que se dilató durante casi tres años hasta el 2002. Evidentemente este motivo de inhomogeneidad sólo podría subsanarse en futuras actualizaciones si la gestión y planificación de la instalación se realizase en pocas semanas y no años como sucedió entonces.

Otra fuente de inhomogeneidad en los datos de observación se debe a la incorporación de sistemas pertenecientes a servicios meteorológicos vecinos. Así desde enero de 2003, como consecuencia del inicio de la colaboración con el Instituto Meteorológico de Portugal en este ámbito de observación, se incorporaron a la red del INM otras cuatro estaciones GPS situadas en el Portugal peninsular proporcionando una mejora sustancial en las prestaciones en el oeste peninsular y áreas marítimas adyacentes. La influencia de la incorporación en 2004 de otras cinco estaciones de detección propiedad de Meteo France a las cinco que compartíamos ya desde el inicio de la cooperación franco-hispana, allá por el año 1996, fue también importante en este aspecto pero menos significativa, al menos en el interior peninsular y en las zonas marítimas aledañas al norte peninsular.

El aprovechamiento conjunto de las estaciones de radiodetección de los servicios meteorológicos vecinos nos ha proporcionado múltiples beneficios como la ampliación de la superficie de cobertura de la red de vigilancia propia y la mejora sustancial de las prestaciones de calidad sobre todo en las zonas periféricas. Una de las mejoras más notables es precisamente la reducción de la vulnerabilidad de nuestro propio sistema de seguimiento del fenómeno tormentoso en las zonas periféricas o externas a la red supeditada sin la colaboración internacional a la disponibilidad absoluta de todas las estaciones propias (lo que está lejos de cumplirse al rondar la disponibilidad el 80% en instalaciones nuevas).

La cooperación internacional también proporciona una reducción muy significativa de algunas incertidumbres de los métodos de localización como las falsas localizaciones de algunos sucesos. Estas son una de las limitaciones o errores que se dan infrecuentemente sobre todo en la periferia de las redes como resultado de la escasez de cobertura. Este es el caso de las series contempladas para Ceuta y Melilla donde hemos podido constatar una reducción significativa en el número de sucesos (periodos de tormenta diarios) que nos indica una insuficiencia de cobertura en la región. Esa

insuficiencia nos ha obligado a modificar el criterio de selección seguido con el resto de provincias y territorios españoles relajando levemente los criterios tanto en Ceuta como en Melilla.

Desde la perspectiva de la homogeneidad de las series, podríamos considerar que el inicio de la cooperación termina con una fase de inhomogeneidad en los datos de observación en esas zonas limítrofes. Con el uso compartido de recursos de observación se podría ahorrar costes incluso en la fase de definición de las necesidades nacionales y por añadidura supondría el inicio del registro de datos de alta calidad con garantías de homogeneidad para las partes. Desde esta perspectiva, todavía nos encontramos en condiciones de manifiesta mejoría al menos con la mitad de los vecinos que disponiendo de redes ya han solicitado nuestra cooperación.

En cualquier caso, la colaboración entre servicios meteorológicos nacionales también nos trae un cierto grado de inhomogeneidad, inevitable, al menos por el momento, hasta que no se establezca una colaboración técnica y operacional más intensa entre los sistemas de radiodetección internacionales para la definición y consecución de unos criterios semejantes en la sensibilidad de los sistemas nacionales que proporcionen unas características de calidad y una configuración parecida de los sistemas nacionales con independencia de los distintos fabricantes.



Fig. 1.- Posición de las 34 estaciones de detección de descargas operadas por la red de descargas eléctricas de España.

La configuración de un sistema de radiodetección se efectúa mediante la fijación de umbrales de sensibilidad en las estaciones que permita distinguir los pulsos electromagnéticos asociados a descargas eléctricas atmosféricas de la misma intensidad a distancias semejantes. Esa configuración conlleva además la definición de los requisitos electromagnéticos que han de reunir las señales detectadas para su identificación como descargas

atmosféricas. Además la configuración establece otros procesos que filtran la información de detección tanto en las estaciones de campo como en los sistemas de concentración y cálculo de la posición de las descargas.

El fenómeno observable considerado en este estudio es el de mayor resolución que proporciona el sistema: cada una de las descargas constitutivas de los rayos (lo que en las publicaciones anglosajonas se conoce como “strokes”) con la excepción de las descargas intranube que no han formado parte del programa de observación eléctrica oficial durante este periodo interanual.

Por último, la incorporación de las estaciones de radiodetección de Canarias en junio de 2005 supuso una ampliación sobresaliente en la capacidad de exploración en grandes zonas marítimas de las que anteriormente no teníamos datos. Sin embargo, su funcionamiento es muy reciente abarcando tan solo dos años y medio del total del periodo. Además la superficie de las islas es muy pequeña como para conseguir una captura de datos tan elevada como en las provincias peninsulares. Todos estos factores unidos a los criterios exigidos en este estudio revelan aún una insuficiencia en el número de episodios para sacar conclusiones y obtener los productos con fundamento estadístico si no fuese con una adaptación específica aún mayor que el caso de Ceuta y Melilla. Por ese motivo sólo consideraremos entre los resultados la región oceánica denominada zona marítima de Canarias de entre la totalidad de zonas marítimas referidas en la figura 2.

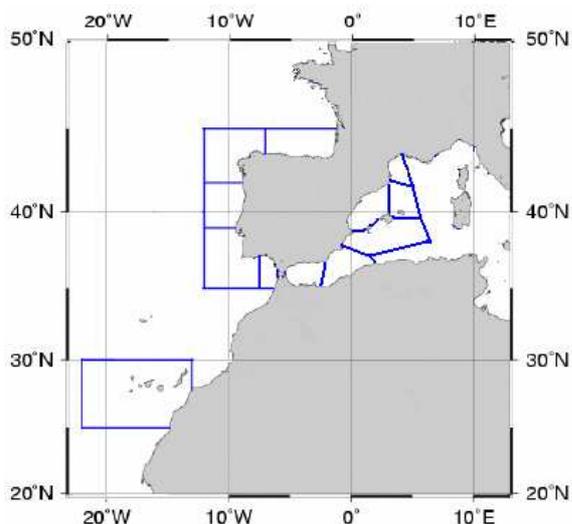


Fig. 2.- Zonas marítimas estudiadas y valoradas según las características de sus tormentas.

En consecuencia con todo lo expuesto anteriormente, los territorios pueden ser clasificados en dos grupos según el periodo de disponibilidad de

datos y su homogeneidad: un núcleo de datos de muy alta homogeneidad formado por los datos de descargas eléctricas del interior peninsular y gran parte de las zonas marítimas aledañas. El otro núcleo estaría formado por zonas periféricas con un grado menor de homogeneidad y además con una disponibilidad y calidad en los datos inferior que en ocasiones es insuficiente y así se expresará en los resultados.

En resumen: las provincias peninsulares disponen de buenos niveles de homogeneidad y su disponibilidad abarca la totalidad del periodo con una calidad más o menos semejante en los datos. Las zonas marítimas costeras peninsulares así como Portugal y las zonas marítimas de Baleares y Alborán presentan una disponibilidad razonable (con ciertas insuficiencias en Ceuta y Melilla). Por último, los datos de las islas del archipiélago Canario y sus zonas marítimas próximas están disponibles sólo a partir de junio de 2005. Algo parecido ocurre con las zonas marítimas atlánticas próximas a Bretaña así como las áreas mediterráneas de las inmediaciones del Golfo de Génova, a Córcega o a Cerdeña que están disponibles tan solo desde el 2004, por tanto, quedan fuera del objetivo de este estudio.

Consideraciones sobre el objetivo y el método de estudio

Como consideración previa y referencia inicial hemos realizado un análisis interanual del periodo 2000–2007 con datos de las estaciones GPS. No se han obtenido resultados representativos para el archipiélago canario por insuficiencia de tiempo en la muestra de datos. El resultado de esta valoración puede verse en el mapa del número medio anual de tormentas que aparece en la figura nº 3, en el que se mantienen y corroboran las características generales del fenómeno tal cual se describieron también preliminarmente para los primeros cinco años de esta década. Los resultados son muy similares también a los análisis realizados con datos de la tecnología angular de radiogoniómetros proporcionados durante la década precedente.

Para la realización del mapa con el número medio anual de tormentas hemos considerado el total de descargas entre nube y tierra registradas por la red del INM en el periodo de referencia agrupándolas en una rejilla cuadrada de 10 km. de lado de resolución. Para la obtención del mapa se ha considerado como día de tormenta aquel en que se ha registrado dentro de la celdilla al menos una descarga aunque para las valoraciones que se efectúan después describiendo más pormenorizadamente las características locales de los periodos de tormenta se hayan tenido que desestimar los días que sólo presentaban una descarga.

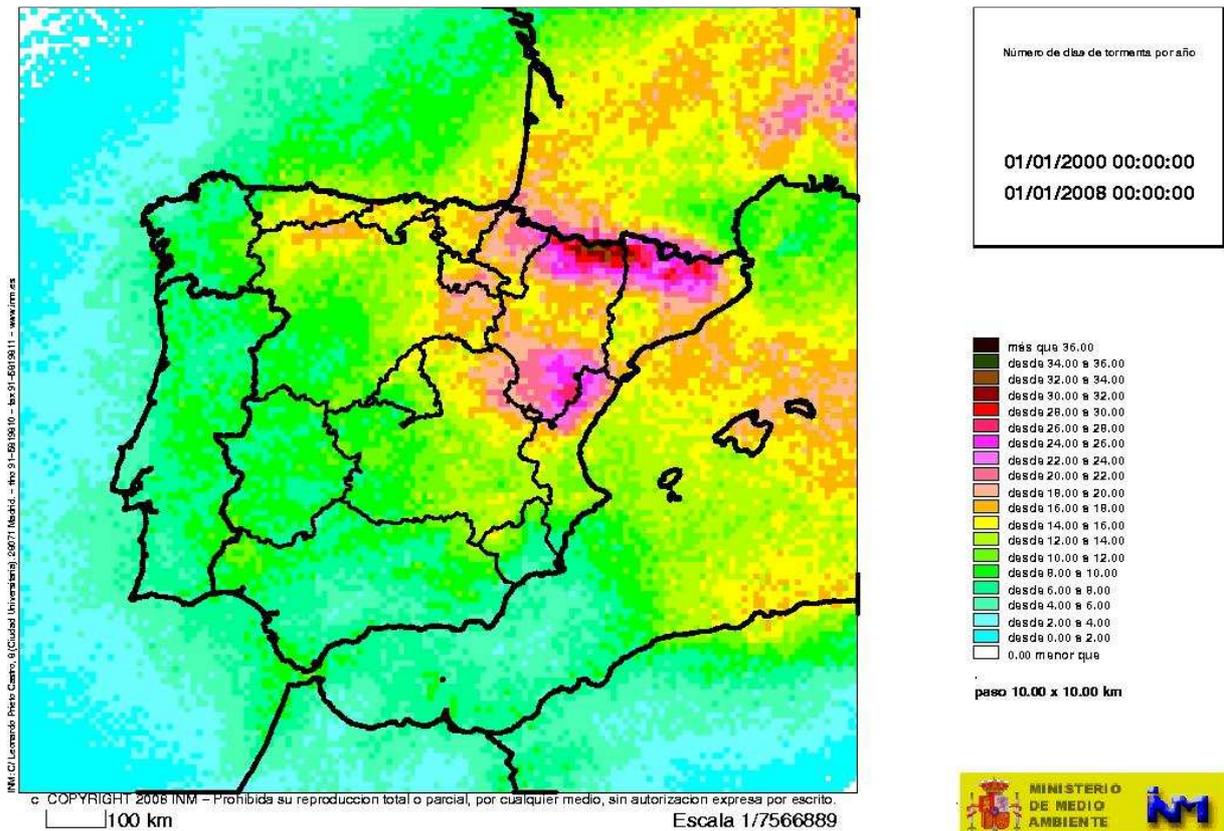


Fig. 1.- Número medio de días de tormenta por año durante el período interanual 2000 – 2007 (ambos inclusive)

Con carácter general puede observarse que la actividad elevada prevalece en las zonas continentales aunque también se extiende a las zonas marítimas mediterráneas más cálidas. Como en otras zonas del planeta las zonas oceánicas más frías presentan mínimos de actividad eléctrica.

Se observa que la distribución de tormentas presenta máximos relativos en los sistemas montañosos y mínimos locales en las zonas de valle o de menor altitud por donde discurren los grandes ríos.

Así mismo se puede apreciar que el cuadrante NE peninsular presenta el máximo número de tormentas. En las laderas pirenaicas de Aragón se registran los valores extremos absolutos revelando una componente sur en el del flujo atmosférico que las origina.

El principal objetivo de este trabajo es la definición de los umbrales estadísticos que pueden servir para la puesta en marcha de un sistema automático que evalúe y proporcione aviso del grado de actividad eléctrica observado durante la hora precedente en tiempo real. Para tal fin hemos fijado nuestra atención en las consideraciones que se hacen sobre la evaluación de la “rareza del fenómeno” de tormenta eléctrica en plan nacional de predicción y vigilancia de la meteorología adversa (meteoalerta).

De acuerdo con lo expresado en el plan “meteoalerta” consideramos cuatro niveles básicos en la observación del riesgo de tormenta eléctrica en un lugar dado que se corresponden con los criterios y colores allí definidos. A saber:

- **Nivel verde:** sin riesgo de tormenta. Esta ausencia de riesgo se observa sólo en las situaciones en las que no se ha registrado ninguna descarga en la hora precedente.
- **Nivel amarillo:** con riesgo de tormenta pero sin que este afecte de modo importante a la población. Entendemos que tan pronto aparece la primera descarga en el territorio vigilado nos encontramos en esta situación de riesgo inicial.
- **Nivel naranja:** con riesgo importante. Esta intensidad en el fenómeno se alcanza siempre que se supere un umbral medio de actividad eléctrica horaria local de los días en los que se dio el fenómeno.
- **Nivel rojo:** con riesgo extremo para la población. Se alcanzaría sólo en aquellas ocasiones en que la actividad superase un umbral medio de actividad eléctrica máxima horaria local de los días en los que se

observó el fenómeno con determinada intensidad mínima.

En las siguientes valoraciones el riesgo se referirá a la evaluación objetiva del grado de actividad eléctrica de las observaciones correspondientes a la hora precedente y su comparación con las características históricas del fenómeno en cada territorio o zona de alerta.

Siguiendo las indicaciones de meteoadvertencia el nivel verde en el seguimiento y vigilancia de tormentas eléctricas claramente ha de corresponder a la inexistencia de actividad eléctrica registrada en la última hora. En consecuencia, el paso al nivel amarillo se daría inmediatamente en el instante en que se observase la primera descarga en la zona de vigilancia tal como hemos comentado anteriormente. Nuestro problema por tanto, se reduce a encontrar los dos umbrales adicionales que han de servir para caracterizar cuando la observación de este inusual electrometeoro puede alcanzar la categoría de riesgo importante e incluso extremo para las actividades humanas, la seguridad de las personas o la integridad del medio ambiente.

Por establecer un simil clarificador del problema consideremos la conocida diferencia entre las escalas Mercalli y Richter para la evaluación de la intensidad de los sismos. La escala Mercalli centra su atención en la valoración local y subjetiva por tanto de los efectos y daños ocasionados por el terremoto mientras que la Richter lo hace en la evaluación objetiva de las características específicas de cada sismograma.

En el diseño de un sistema automático de avisos no podemos entrar en cual ha sido la valoración de los efectos y consecuencias desastrosas de las descargas eléctricas como se hace en la escala subjetiva de intensidad de terremotos. Sin embargo, nuestra propuesta relativiza localmente el grado de intensidad o la magnitud del electrometeoro tomando en consideración los valores de ciertas magnitudes indicadoras de la incidencia histórica de las tormentas locales.

Se han analizado las efemérides de todas las tormentas registradas por el sistema de radiodetección para alcanzar el objetivo. Por tanto, la evaluación de su magnitud o nivel se hace de modo automático refiriendo las observaciones realizadas en tiempo real a las características físicas del fenómeno de acuerdo con su distribución geográfica y temporal. O sea, su evaluación es totalmente objetiva. Esto no significa que se desdeñe la utilidad pudiera tener el conocimiento de los efectos y las consecuencias de las tormentas eléctricas en la población sobre todo como procedimiento para la elaboración y divulgación de

medidas preventivas y mitigadoras de los peores efectos y daños (casi 2200 fulminados entre 1940 y 2002). Al contrario, estas consecuencias son precisamente las motivaciones que justifican la necesidad de la puesta en marcha de un sistema de prevención objetivo y rápido.

Una parte de nuestro análisis estadístico se ha centrado en la obtención y descripción de los ciclos diarios medios de actividad local agrupados por meses, estaciones y años. Hemos procedido de diferentes formas a la agrupación temporal de descargas para la obtención de los parámetros estadísticos característicos de tales ciclos. Como consecuencia hemos segregado distintas bases de datos contabilizando el número de sucesos horarios que se han dado cada día del periodo. De aquí hemos extraído algunas efemérides extremas tanto diarias como horarias de cómo se da el fenómeno en cada una de las provincias, islas, ciudades autónomas y zonas marítimas de interés.

Este modo de proceder nos ha permitido por primera vez conocer con exactitud y detalle los datos sobre la distribución provincial, autonómica, peninsular e insular de descargas eléctricas así como algunas de las características más notables del fenómeno que exponemos a continuación y resumimos en las tablas nº 1 y 2.

Los contornos provinciales, de islas, y zonas marítimas de las superficies geográficas consideradas en adelante han sido digitalizados por los autores sin contemplar los enclaves históricos internos que presentan algunas provincias. El grado de precisión y detalle de esta digitalización es coherente con la precisión en la localización de las descargas eléctricas que se utilizan para el seguimiento del fenómeno.

Valoración de la actividad media horaria y de la duración del periodo diario de tormenta

Consideramos que las magnitudes que mejor caracterizan la actividad eléctrica provincial o de cualquiera de los territorios analizados son las siguientes: el valor medio del número de descargas registradas por hora durante la duración del periodo de tormenta diario y el valor medio del máximo número de descargas a la hora registrado en cada episodio diario durante el mismo periodo. Ambos son los dos umbrales idóneos para caracterizar los umbrales de riesgo anteriormente mencionados.

Estos dos valores, junto con la duración media del periodo de tormenta diario y el valor medio de la hora en que se alcanzó el máximo número de descargas cada día conforman las principales características de las tormentas eléctricas en cada territorio considerado.

El valor medio del número de descargas por hora que presentan las tormentas eléctricas durante su periodo de actividad diaria se ha obtenido haciendo uso de un criterio previo de selección. Sólo se consideran aquellos días durante los que se han registrado al menos dos descargas. Este criterio permite escoger una muestra de episodios de trabajo de los que se ha eliminado la posibilidad de que alguno de los episodios pudiera corresponder a una falsa localización de descarga al no disponerse más que una sola muestra de actividad en toda una provincia durante todo el día.

Los errores de posicionamiento del sistema de cálculo que ocasionan eventualmente alguna descarga falsamente localizada no se dan con mucha frecuencia en el interior peninsular y los casos probables son en la práctica claramente reconocibles por la aparición de una descarga aislada del resto en las zonas de actividad. Esta exigencia es obvio que restaría un cierto porcentaje de días con auténtica tormenta eléctrica sobre todo en las provincias de menor extensión si fuese nuestra intención averiguar el número de días de tormenta provincial. Pero nuestro objetivo no es determinar ese número ya que previamente se ha establecido en el mapa de la figura nº 3 con la metodología allí explicada para su cálculo correcto.

Hemos centrado nuestra atención en evaluar con la mayor representatividad y precaución posibles el comportamiento medio de las tormentas en su ritmo de producción de descargas local y para ello es imprescindible evitar los episodios dudosos.

De este modo la valoración que aquí hacemos desde el punto de vista estadístico podría excluir los episodios de tormenta más débiles y, por tanto, es una aproximación ligeramente por exceso al valor medio de descargas horarias por periodo de actividad. Insistimos por tanto, en que estos son aún resultados preliminares hasta que no se alcance el periodo interanual con homogeneidad de once años. Sin embargo, se ha analizado uno a uno cada episodio diario de tormenta en cada territorio para que haya la certidumbre de que en la valoración se han considerado todos los episodios significativos registrados durante la totalidad del periodo para la obtención del valor medio horario.

Provincialmente entorno a un 15 ó un 20% de los días de tormenta registrados por la red han sido rechazados para la obtención de un umbral medio horario de actividad que asegure la no existencia de falsas localizaciones eléctricas. Contabilizados de este modo el número total de descargas de esos días y las horas que abarcó el episodio de tormenta se dedujeron los valores medios horarios de cada día sin más que realizar el cociente entre ambos.

Máximo absoluto horario			Máximo absoluto diario	
Descargas/Hora			Descargas/Día	
Valor	Hora	Día	Valor	Día

ANDALUCÍA				
Almería	1150	15	23-ago-02	3365 23-ago-02
Cádiz	814	15	12-sep-06	2445 12-sep-06
Córdoba	818	16	22-may-01	2653 8-abr-05
Granada	1559	20	30-jun-02	4507 30-jun-02
Huelva	1030	15	12-sep-06	2679 6-sep-06
Jaén	1398	18	13-jun-04	2823 5-sep-03
Málaga	592	7	14-oct-03	2526 12-sep-06
Sevilla	1213	19	06-sep-06	3577 12-sep-06
ARAGÓN				
Huesca	2328	16	14-jul-06	8230 1-ago-05
Teruel	4563	18	16-ago-02	17421 23-ago-02
Zaragoza	5011	16	19-jul-06	11814 20-sep-02
ASTURIAS				
Asturias	3046	17	01-ago-01	7630 13-ago-01
BALEARES				
I. de Formentera	134	11	29-sep-03	220 27-sep-00
I. de Ibiza	555	22	06-sep-01	1030 6-sep-01
I. de Mallorca	1459	0	13-sep-06	3071 15-sep-04
I. de Menorca	1234	17	07-sep-03	1519 13-sep-02
CANTABRIA				
Cantabria	1826	16	13-ago-01	3684 7-sep-04
CASTILLA-LEÓN				
Ávila	960	20	18-jun-04	2093 18-jun-04
Burgos	3702	20	18-jun-04	7228 18-jun-04
León	4038	19	13-ago-01	9160 13-ago-01
Palencia	1519	19	19-jun-05	6536 11-sep-00
Salamanca	1455	8	11-sep-00	4035 11-sep-00
Segovia	897	18	18-jun-04	2400 18-jun-04
Soria	1742	15	03-sep-04	8887 4-sep-03
Valladolid	1502	18	13-ago-01	5051 18-jun-04
Zamora	1980	7	11-sep-00	9314 11-sep-00
CASTILLA LA MANCHA				
Albacete	1073	16	22-jun-05	3854 21-ago-02
Ciudad Real	1739	16	18-may-01	5734 18-may-01
Cuenca	2042	20	13-ago-01	7116 2-sep-04
Guadalajara	1685	21	23-ago-02	6738 23-ago-02
Toledo	1038	19	06-sep-06	2817 7-jul-07
CATALUNYA				
Barcelona	4987	8	17-ago-03	8974 6-ago-07
Girona	2022	16	25-sep-05	5358 13-sep-06
Lleida	3951	0	06-sep-05	6418 14-jul-01
Tarragona	6555	7	17-ago-03	13868 17-ago-03
EUSKADI				
Álava	895	19	18-jul-06	1212 18-jun-04
Guipúzcoa	1270	2	26-ago-01	2000 26-ago-01
Vizcaya	473	18	20-jul-02	882 16-sep-07
EXTREMADURA				
Cáceres	1379	22	06-sep-06	3376 25-ago-02
Badajoz	2616	20	06-sep-06	11934 6-sep-06
GALICIA				
Acoruña	1503	18	27-ago-01	2491 27-ago-01
Lugo	5272	18	26-ago-01	9526 26-ago-01
Ourense	1085	16	22-may-04	2773 22-may-04
Pontevedra	868	17	27-ago-01	1421 27-ago-01
LA RIOJA				
LaRioja	2632	8	08-jul-02	5366 8-jul-02
MADRID				
Madrid	1300	17	06-sep-06	3219 6-sep-06
MURCIA				
Murcia	885	3	17-ago-03	1180 14-jun-04
NAVARRA				
Navarra	4075	9	08-jul-02	9867 2-sep-04
VALENCIA				
Alicante	1720	16	08-ago-02	3479 24-ago-02
Castellón	11675	5	17-ago-03	16548 17-ago-03
Valencia	3105	4	17-ago-03	5755 14-sep-07
CIUDADES AUTÓNOMAS				
Ceuta	26	7	13-sep-07	90 13-sep-07
Melilla	6	19	03-dic-04	8 24-nov-07

Tabla 1.- Resumen de las efemérides de descargas nube tierra del periodo 2000 – 2007 sucedidas en las provincias e islas españolas. Se expresa la hora GMT.

A continuación, tras la clasificación de los episodios por trimestres anuales como método más cómodo de trabajo y muy cercano a las estaciones del año se calcularon los valores medios de los episodios registrados en cada uno. Estos valores se recogen en la tabla nº 3 bajo la cabecera “Media Horaria” y la columna adecuada según el periodo considerado.

	Máximo absoluto horario			Máximo absoluto diario	
	Descargas/Hora			Descargas/Día	
	Valor	Hora	Día	Valor	Día
Alborán	1831	16	06-oct-03	9101	14-oct-03
Baleares	10249	21	25-sep-05	51896	12-sep-06
Canarias	1454	1	01-nov-06	10408	19-mar-07
Cantábrico	4923	16	27-jul-06	35796	27-jul-06
Finisterre	1490	19	27-ago-01	6741	8-oct-04
Estrecho	272	11	13-sep-07	704	13-sep-07
Cabo San Vicente	2126	7	02-oct-07	9996	15-oct-07
Cabo Palos	3408	1	12-nov-05	12610	28-oct-07
Porto	1150	6	16-feb-07	3458	17-oct-06
Z. M. de Cabrera	8369	23	09-ago-02	42645	12-oct-07
Z. M. de Cádiz	485	10	13-sep-07	1228	2-oct-07
Z. M. de León	6014	11	17-ago-03	17447	6-sep-05
Z. M. de Menorca	5619	13	18-sep-00	47381	6-sep-05

Tabla 2.- Resumen de las efemérides de descargas nube tierra del periodo 2000 – 2007(*) sucedidas en las zonas marítimas de interés para España. Se expresa la hora GMT. (*) Excepto la Zona Marítima de Canarias que se refiere al periodo entre junio de 2005 y diciembre de 2007.

Con la excepción de Melilla durante los trimestres de primavera y verano en los que no ha habido constancia de actividad en todo el periodo considerado en el resto de territorios considerados el número de episodios manejado ha sido suficiente para tener una valoración preliminar representativa de la actividad media del periodo.

La consideración de alrededor de algo más del 80% de periodos diarios de tormenta en este estudio es un porcentaje claramente representativo de los sucesos tormentosos locales en la generalidad de los casos. Pero cuando la caracterización que se pretende es mensual la “rareza del fenómeno” se vislumbra por la insuficiencia de datos y se hace más ostensible aún en los territorios más pequeños (islas como la Cabrera, así como todas las del archipiélago canario han sido descartadas de los resultados) Aún más en Melilla por ejemplo no hay ningún episodio de tormenta que se haya registrado ni en la primavera ni en el verano en todo el intervalo interanual considerado.

Tanto Ceuta como Melilla son pequeñas plazas de apenas unas decenas de km² de superficie. De este modo los requisitos exigidos para el resto de provincias e incluso islas se convierten aquí en extremadamente exigentes. El resultado es que el número de episodios rechazados rondaba el 50% (al exigir un mínimo de 2 descargas diarias para tomar en cuenta el día en la valoración de la actividad media) Entre los rechazados quizás hubiera alguna falsa localización. Sin embargo, el problema más probable en estas plazas sea que la eficiencia en la localización de descargas del sistema sea tan baja por ser zonas externas a la red y tener pobre cobertura en un contexto de las estaciones más próximas más alejadas de 300 km de Melilla (San Javier, Armilla y Hinojosa) y con indisponibilidades funcionales prolongadas en ocasiones durante años (Armilla e Hinojosa)

Por tanto, resulta evidente que no están aquí considerados todos los días en que se dio tormenta en ambas ciudades entre otras razones porque como ya se explicó anteriormente la configuración del sistema está tarada para excluir expresamente la detección de descargas intranube (a veces son las únicas que se presentan en los vulgarmente conocidos como “amagos tormentosos” en los cuales es perfectamente posible una única descarga hacia el suelo aislada)

Valoración de la media de actividad máxima diaria y de su hora media

El segundo umbral propuesto para la sintonización del sistema automático de detección de la presencia de riesgo extremo en una determinada provincia se refiere al valor medio de los máximos de actividad horaria de los periodos de tormenta registrados con la red. Pero al igual que ocurría cuando emprendimos el estudio del valor medio horario por periodo de tormenta ahora hacemos una nueva selección de los días de tormenta escogiendo sólo aquellos que superan un umbral medio de actividad.

Ahora pretendemos caracterizar sólo aquellos periodos en que la actividad tormentosa diaria se ha presentado de modo intenso. Entendiendo por periodo de intensa actividad aquellas horas en que se ha registrado un número total de descargas que haya superado el menor valor medio de actividad diaria obtenido localmente para alguno de los periodos del año estimados (el año completo o cada trimestre estacional). Así mismo se ha registrado la hora GMT en la que se produjo cada día este máximo de actividad promediándola para todo el año o trimestre considerado.

A nadie se le escapará que para esta nueva caracterización del comportamiento extremo en intensidad de los periodos de tormenta hemos de echar mano de tormentas realmente intensas. Para ello se ha reducido el conjunto de muestreo de los sucesos aún más de lo que ocurrió para la caracterización del común de los días de tormenta.

En efecto, ahora tan sólo consideramos entre un 40 o 50 % de los días de tormenta realmente observados en cada territorio de estudio. Por tanto, se ha reducido la muestra aproximadamente a la mitad en la mayoría de las zonas. Pero al igual que sucedía en la primera selección hasta el 80%, la muestra sigue siendo representativa aunque mantengamos la exigencia de que para pertenecer a este club de tormentas intensas tenga que ser la actividad horaria máxima del día candidato mayor que la mínima de entre las medias obtenidas para todo el intervalo interanual o en algún periodo temporal del mismo.

La excepción vuelve a darse en el caso de los resultados obtenidos para las dos plazas del norte de África en las que ha habido que situar el mínimo de actividad exigido de la selección de periodos intensos en superar o igualar el valor medio horario que aparece en la tabla 3. Esto es, dos o más descargas a la hora en el caso de Ceuta con lo que nos han quedado quince episodios tormentosos (de 43 registrados) para averiguar los valores medios de los extremos (en vez de nueve que quedaron con el criterio inicial)

Por su parte para Melilla hubo apurar aún más el criterio de selección de las tormentas consideradas intensas del total de 32 que se registraron en todo el periodo. Ahora ha bastado para considerarse como tormenta intensa en esta plaza el que en la hora del máximo se hubiesen dado las dos descargas. En total se permitió la valoración de 13 tormentas de un total de sólo seis con el criterio general.

Valoración de otras magnitudes

Hemos añadido a las magnitudes anteriormente discutidas los valores medios provinciales registrados en todo el periodo de estudio del número de descargas por año y unidad de superficie (100 km² en este caso). Para este propósito no se efectuó ningún filtrado de los datos obrantes en el registro de la red de rayos.

Este valor de la densidad de descargas por unidad de área sirve para establecer una clasificación de provincias por orden de actividad y, por supuesto, para relativizar el orden de magnitud de este índice ceraúnico global de unas áreas en relación a las demás. Así se ha podido concluir que la provincia con mayor actividad por unidad de superficie es Teruel, seguida inmediatamente después por Barcelona, Castellón de la Plana, Tarragona, Huesca, Lleida y la isla de Menorca por orden de mayor a menor actividad. Todas ellas con un orden de magnitud mayor en el índice ceraúnico respecto a las provincias que resultaron poseer la menor actividad: A Coruña, Málaga, Melilla, Cádiz, Sevilla y Pontevedra explicitadas en orden de menor a mayor actividad pero también con el mismo orden de magnitud.

La digitalización provincial llevada a cabo nos ha permitido también la obtención de ciertos rasgos descriptivos de la distribución de descargas media anual en la superficie nacional (excluidas las Islas Canarias). De este modo ahora sabemos que un total de 744.696 descargas anuales han sido detectadas en España por término medio con el sistema de la red de rayos (incluyendo las islas Baleares pero excluyendo Canarias).

Además un total de 478.720 descargas caen anualmente sobre las zonas marítimas de interés excluidas la zona marítima de Canarias en la cual durante el corto periodo de funcionamiento se han registrado 1.672.594, lo que hace un total de 669.037 descargas por año. Un dato bastante revelador para ser una zona donde algunos suponían prácticamente ausentes las tormentas hace pocos años.

Resultados y conclusiones

Del estudio e inspección detenida de las tablas aquí presentadas se derivan múltiples conclusiones sobre la caracterización y descripción local del riesgo de tormenta: el número de días que se presenta el fenómeno eléctrico, su duración horaria promedio, su intensidad media horaria, su intensidad máxima horaria, la hora promedio a la que se da, ...etc. Todas estas características del periodo de tormenta deducidas en términos objetivos y con criterios claros, concisos y breves por medio de unas magnitudes también claras y sobre todo cuantificables y contrastables por cualquier observador.

No parece muy exagerado concluir que la evaluación y descripción minuciosa de las características locales de los periodos de tormenta ha dejado de ser un misterio para constituirse en una herramienta de consulta fácil y si se quiere, puede posibilitar la sintonización sencilla del Sistema de Aviso Por Impacto de Rayos (SAPIR) para el funcionamiento completamente automático de todo el conjunto de sistemas de observación, seguimiento e incluso aviso a la sociedad.

Es impensable que la evaluación de la actividad ceraúnica real que aquí se propone realizar de modo rutinario para todas las unidades territoriales administrativas o políticas que se desee se pueda hacer de modo manual; o sea, descansando en la actividad humana. Afortunadamente, desde hace tiempo disponemos de máquinas que nos auxilian y sustituyen de un modo rápido, fiel a criterios únicos e inasequible al desaliento de en esas tareas rutinarias. Al factor humano corresponde la introducción de la inteligencia del sistema, en este caso la digitalización de las unidades geográficas de interés y la introducción de consideraciones en la evaluación de los umbrales que representan el riesgo para la sociedad con los que ha de funcionar el sistema. Pues bien, aquí los tenemos.

La evaluación de la intensidad de la actividad tormentosa real es efectuada por el Sistema de Aviso Por Impacto de Rayos (SAPIR) operacional en el INM desde febrero de 2005 tomando como territorios de exploración las denominadas zonas de alerta.

Duración media					Media horaria					Media máximo horario					Hora máximo					Media anual 100 Km ²
Horas					Descargas/Hora					Descargas/Hora					Horas (G.M.T.)					
A	I	P	V	O	A	I	P	V	O	A	I	P	V	O	A	I	P	V	O	

ANDALUCÍA																					
Almería	4.1	3.6	3.8	4.4	4.2	23	17	14	31	26	85	70	54	98	110	14	12	14	14	15	50
Cádiz	5.0	4.6	5.0	4.9	5.4	14	6	13	42	8	47	21	46	131	43	12	13	12	13	13	36
Córdoba	4.6	3.6	5.0	4.8	4.4	31	11	30	44	29	104	50	98	153	93	14	15	14	15	13	49
Granada	4.7	3.7	4.9	5.0	4.2	25	4	25	29	28	69	15	66	77	86	14	14	14	14	15	50
Huelva	5.1	4.3	5.3	5.0	5.3	26	11	31	42	22	97	52	99	134	97	14	13	14	15	12	60
Jaén	4.8	3.2	5.4	4.9	4.2	31	13	29	37	34	107	55	109	111	124	15	14	14	15	16	58
Málaga	4.4	4.2	3.9	4.8	4.9	17	7	13	38	13	59	27	59	108	51	12	11	12	12	14	35
Sevilla	5.3	5.0	5.4	5.2	5.3	22	9	22	40	19	77	40	68	129	81	14	15	14	13	13	39
ARAGÓN																					
Huesca	6.2	3.8	5.9	7.4	3.9	92	22	62	126	44	305	112	207	409	167	15	15	15	14	17	318
Teruel	6.2	2.9	6.3	6.8	4.5	134	10	100	180	31	384	42	278	511	132	14	14	15	14	15	484
Zaragoza	6.0	3.1	5.9	7.0	4.1	93	18	70	127	27	337	54	257	454	145	15	15	16	15	14	259
ASTURIAS																					
Asturias	5.3	4.7	5.3	5.9	5.0	60	7	65	99	13	194	27	183	298	60	14	14	15	14	14	192
BALEARES																					
I. de Formentera	2.2	2.7	1.3	2.4	2.1	9	3	6	14	6	20	7	15	34	13	10	7	14	9	11	223
I. de Ibiza	2.6	2.1	1.2	3.0	2.9	27	7	10	37	24	71	23	27	98	60	10	9	9	11	11	263
I. de Mallorca	4.1	3.0	2.7	4.9	4.6	50	10	23	87	30	175	46	79	272	119	11	12	11	11	11	274
I. de Menorca	2.9	1.8	2.1	3.3	3.3	25	9	13	43	17	87	26	40	147	61	10	10	12	9	10	307
CANTABRIA																					
Cantabria	4.8	5.5	4.5	4.5	5.3	33	6	35	56	12	103	20	106	143	49	14	10	14	14	14	161
CASTILLA-LEÓN																					
Ávila	4.8	2.7	5.1	5.4	3.3	32	12	25	47	13	109	70	90	147	36	14	15	15	14	11	84
Burgos	5.3	3.0	5.4	6.4	3.3	63	8	57	86	13	189	33	170	244	58	15	14	16	15	14	163
León	5.6	2.5	5.9	6.8	3.7	97	8	84	138	16	291	50	232	402	83	14	14	15	14	14	207
Palencia	4.7	1.7	5.0	5.6	2.8	55	8	42	79	15	162	23	130	219	63	15	15	16	14	13	161
Salamanca	4.7	2.5	5.1	5.6	3.3	37	17	31	52	16	125	79	114	146	82	15	15	15	15	15	65
Segovia	4.7	1.6	4.8	5.3	3.2	33	17	30	39	13	115	136	108	129	48	14	17	15	14	12	104
Soria	5.6	2.5	5.8	6.4	3.5	70	17	50	96	26	216	96	150	299	97	14	11	15	14	14	235
Valladolid	4.5	2.6	4.7	5.0	2.6	39	10	32	53	11	118	37	94	161	35	14	13	14	15	14	88
Zamora	4.9	2.2	5.1	5.8	2.8	55	8	38	83	14	152	27	125	207	43	14	12	15	14	16	107
CASTILLA LA MANCHA																					
Albacete	5.4	3.0	5.6	5.8	4.5	49	15	40	66	22	152	73	124	196	89	14	13	15	15	13	110
Ciudad Real	5.5	2.8	6.2	5.5	5.0	49	7	51	55	44	134	20	138	158	107	15	12	15	15	14	80
Cuenca	5.6	2.7	5.9	6.5	3.8	74	13	62	102	30	235	64	205	305	96	15	17	14	15	14	165
Guadalajara	5.5	2.5	5.7	6.4	3.4	65	9	55	85	22	187	31	158	241	86	15	15	15	14	14	196
Toledo	5.6	2.6	6.3	5.6	5.3	40	8	36	53	33	117	31	102	159	93	14	15	14	14	13	76
CATALUNYA																					
Barcelona	5.0	2.7	4.6	5.9	4.8	96	16	51	137	70	300	61	164	425	243	14	15	15	14	13	477
Girona	4.5	2.8	4.2	5.1	4.5	51	12	34	66	39	152	39	110	192	135	14	15	14	14	12	297
Lleida	5.5	2.8	5.0	6.6	4.0	82	26	57	108	29	303	97	222	396	105	15	18	15	14	14	311
Tarragona	5.0	2.9	3.9	5.9	5.6	82	11	51	112	49	286	39	189	394	186	13	15	13	13	13	388
EUSKADI																					
Álava	3.6	2.8	3.6	4.0	2.6	32	5	31	42	10	95	22	84	123	38	14	12	15	14	14	163
Guipúzcoa	3.5	4.5	3.1	3.3	3.7	20	6	18	36	8	55	23	45	85	20	13	12	15	13	12	153
Vizcaya	3.6	4.8	3.0	3.3	4.5	20	5	26	30	8	61	13	73	77	26	14	11	15	14	12	134
EXTREMADURA																					
Cáceres	5.6	3.9	6.0	6.2	5.3	38	16	37	56	25	142	88	136	184	99	14	14	15	14	14	57
Badajoz	5.5	3.8	6.1	5.8	5.1	45	12	41	81	32	157	67	146	238	117	14	14	15	14	13	64
GALICIA																					
A Coruña	4.2	3.8	4.0	4.2	4.5	12	5	14	26	5	45	15	44	92	16	13	14	14	14	11	30
Lugo	4.3	3.1	4.3	5.2	3.9	54	5	53	93	15	164	13	140	283	59	15	14	15	15	13	117
Ourense	4.3	2.6	4.4	5.0	3.5	37	6	48	41	7	113	29	129	124	33	14	15	15	14	13	84
Pontevedra	3.8	3.3	3.6	3.6	4.2	15	5	21	31	5	53	16	64	96	17	14	14	14	14	12	45
LA RIOJA																					
La Rioja	4.7	2.4	4.8	5.3	2.6	54	16	40	72	9	165	43	120	225	23	14	14	15	14	15	264
MADRID																					
Madrid	4.7	1.9	5.2	5.0	4.2	34	6	31	44	21	103	16	97	123	85	14	14	15	14	13	107
MURCIA																					
Murcia	4.5	3.6	4.3	4.8	4.9	23	14	19	28	22	89	65	72	105	95	14	13	14	14	12	50
NAVARRA																					
Navarra	5.1	4.0	4.9	5.9	4.0	63	17	41	97	19	229	72	139	344	106	15	11	15	15	17	225
VALENCIA																					
Alicante	4.1	3.5	3.9	4.1	4.8	41	10	27	69	24	134	42	88	202	88	13	12	14	14	13	130
Castellón	5.2	3.1	5.1	5.5	5.8	80	13	52	117	41	265	39	164	368	188	14	14	14	14	13	450
Valencia	4.9	3.2	4.8	5.4	5.0	71	12	45	109	32	236	40	140	354	150	14	13	14	14	14	212
CIUDADES AUTÓNOMAS																					
Ceuta	1.6	1.0	1.4	1.8	1.8	5	2	3	16	3	6	2	4	14	4	11	18	10	8	11	65
Melilla	1.0	1.3	ID	ID	0.9	3	3	ID	ID	4	3	3	ID	ID	3	13	13	ID	ID	12	35

Tabla 3.- Umbral medio y magnitudes que caracterizan los periodos de tormenta locales en el periodo 2000-2007 en las provincias, Islas Baleares y ciudades autónomas. Leyenda: A=anual; I=enero, febrero, y marzo; P=abril, mayo y junio; V=julio, agosto y septiembre; O=octubre, noviembre y diciembre. M. El valor medio se refiere al número de descargas por año y por cada 100 km². El acrónimo ID aparece en caso de insuficiencia de datos.

	Duración media					Media horaria					Media máximo horario					Hora máximo					Media anual
	Horas					Descargas/Hora					Descargas/Hora					Horas (G.M.T.)					
	A	I	P	V	O	A	I	P	V	O	A	I	P	V	O	A	I	P	V	O	
Alborán	6.5	7.5	5.1	4.8	8.0	41	33	15	64	50	146	105	72	297	179	12	12	11	14	11	43
Baleares	7.7	5.9	5.9	9.0	9.1	231	25	68	451	143	771	103	277	1419	497	11	11	11	11	11	387
Canarias	8.1	12.9	3.0	6.5	9.2	35	96	4	6	40	99	232	12	23	114	9	9	11	7	11	4
Cantábrico	7.7	7.1	6.8	8.4	8.3	79	16	68	156	28	314	79	248	557	137	12	12	13	12	12	92
Finisterre	6.4	5.9	5.6	6.0	7.7	20	8	20	31	19	93	39	85	147	79	12	13	13	11	11	11
Estrecho	3.7	3.7	3.2	3.2	4.1	9	7	6	34	5	26	21	16	104	22	12	12	10	12	12	27
Cabo San Vicente	7.5	7.6	6.9	5.3	8.6	26	10	19	23	37	123	52	80	126	177	11	12	10	11	12	12
Cabo Palos	7.3	8.7	5.5	5.2	9.3	46	21	22	49	68	203	92	115	239	307	11	11	11	12	11	48
Porto	6.3	5.6	6.0	5.0	7.4	20	13	20	21	22	95	91	91	109	91	11	11	10	11	11	12
Z. M. de Cabrera	9.3	10.7	6.9	8.2	11.1	114	36	36	237	114	483	175	156	962	486	11	12	12	11	10	141
Z. M. de Cádiz	6.8	7.0	6.5	5.5	7.0	16	10	19	27	15	66	38	80	95	70	10	11	10	12	10	23
Z. M. de León	5.2	3.8	4.3	5.7	6.0	71	10	20	109	66	259	37	86	424	195	12	11	14	12	12	168
Z. M. de Menorca	7.7	7.0	5.4	7.9	9.2	165	24	51	365	116	604	107	203	1169	466	11	12	10	11	11	297

Tabla 4.- Umbrales medios y magnitudes que caracterizan los periodos de tormenta locales en el periodo 2000-2007^(*) en las zonas marítimas de interés para España. Leyenda: A=anual; I=enero, febrero, y marzo; P=abril, mayo y junio; V=julio, agosto y septiembre; O=octubre, noviembre y diciembre. M. anual = valor medio del número de descargas por año cada 100 km² (*) Excepto la Zona Marítima de Canarias que se refiere al periodo entre junio de 2005 y diciembre de 2007.

Las zonas de alerta vigiladas automáticamente por SAPIR tienen formas geométricas sencillas (círculos, poligonales,..etc.) y han sido establecidas por el usuario alrededor de ciertas instalaciones hidroeléctricas estratégicas extremadamente vulnerables al alcance de las descargas eléctricas atmosféricas y capitales para la protección del Sistema de Alerta e Información Hidrológica (SAIH) destinado a la prevención contra inundaciones.

La protección contra rayos fue una demanda de la dirección general del Agua del Ministerio de Medio Ambiente al Instituto Nacional de Meteorología debido a que los fallos de ciertas instalaciones del SAIH durante las tormentas eléctricas dejaban al sistema de protección contra las avenidas en una situación comprometida por la pérdida de algunos elementos cruciales para su buen funcionamiento y reclamaba la disposición de un tiempo necesario para su reparación cuando más falta hacía para otras contingencias (torres de comunicaciones, repetidores,..etc.).

Con la realización de este trabajo de investigación estadística y caracterización del fenómeno tormentoso hemos obtenido la sintonización que necesita SAPIR para actuar sobre las provincias, islas, y otros territorios para determinar automáticamente como se está dando el fenómeno localmente de acuerdo con su historial eléctrico local. Esta información podrá irse mejorando continuamente conforme transcurre el tiempo y crece el registro de datos, a medida que se amplía la colaboración con los sistemas de detección de descargas eléctricas de los países vecinos para mejorar la cobertura y calidad de las observaciones (Italia y Marruecos).

Ahora proponemos la inclusión de las provincias españolas, las islas, las ciudades autónomas y las áreas marítimas aledañas al territorio español para su incorporación al sistema de observación, vigilancia y alerta oficial no sólo como una herramienta experta de apoyo al sistema nacional de predicción sino como un sistema de observación autónomo con capacidad para emitir avisos tempranos destinados a facilitar a las autoridades la gestión de los desastres que contribuya a mejorar la información directa a la población para la protección de sus vidas y haciendas.

Referencias:

- García Pertierra, M^a. M. **Las tormentas en España durante el año agrícola 1979-80**. Calendario Meteoro-Fenológico. Madrid. 1981.
- Pérez Puebla, F., Zancajo Rodríguez, C., González Márquez, J. **Aproximaciones al concepto de tormenta eléctrica**. Calendario Meteorológico 2008. Serie Monografías. INM. Diciembre 2007.
- Pérez Puebla, F. **Sistema de Alerta por impacto de Rayos**. CD-ROM de las XXIX Jornadas Científicas de la AME en Pamplona sobre Aplicaciones Meteorológicas. Madrid. Junio 2006.
- Pérez Puebla, F. **El valor de la información meteorológica sobre electricidad atmosférica**. AMBIENTA. Revista del Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. Noviembre de 2005.
- Pérez Puebla, F. **Protección de instalaciones hidrológicas contra rayos**. 39^a Reunión de Coordinación del SAIH. Málaga. Abril de 2005.