

ESTIMACIÓN DE LA CURVA GLOBAL DE LAS INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITACIÓN

Roberto MONCHO¹, Fernando BELDA² y Vicente CASELLES¹

¹Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Universitat de Valencia.

²Centro Meteorológico Territorial en Valencia. INM.

robert@temps.cat, fbelda@inm.es, vicente.caselles@uv.es

Resumen

Los extremos climáticos suponen un interés especial para la sociedad ya que determinan el nivel de riesgo al que se ven sometidos. De hecho, las grandes infraestructuras se planifican teniendo en cuenta la potencialidad extrema de la pluviosidad de cada región. Pero ¿cuál es esa potencialidad extrema a nivel mundial? Muchos autores han observado que la distribución temporal de las precipitaciones sigue un patrón matemático, una ley que relaciona la pluviosidad máxima mundial en función de la duración del episodio extremo. Sin embargo es necesario preguntarse si dicha ley es de carácter general o si se trata de un fenómeno que está únicamente ligado a los extremos de pluviosidad mundial.

En el siguiente trabajo analizaremos la generalidad de la ley de ‘atenuación de la intensidad de precipitación’ desde diferentes perspectivas, así pues veremos que no sólo podemos interpolar precipitaciones máximas para un determinado tiempo o estimar la probabilidad de nuevos récords mundiales, sino que la ley es más general y es aplicable al ámbito de la meteorología y la climatología local.

1. Introducción

El área mediterránea, y concretamente el mediterráneo occidental, es la zona de Europa con registros de intensidad pluviométrica más elevada. Entre los estudios realizados en España, destacan Martín Vide, (2002), Armengot (1994), y Pérez Cueva (1983), entre otros, aunque también se han registrado lluvias extraordinarias en otros puntos de la península (Elías y Ruiz, 1994) como por ejemplo en el País Vasco (López Unzu, 1986) o en Cantabria (Barcena Odriozola y Pacheco Ibars, 1995).

A nivel mundial destacan los estudios de Thapliyal-Kulshrestha (1992), Paulhus (1965) y Galmarini (2004), entre otros, donde ya se observa claramente un patrón matemático de la pluviosidad en función de la duración.

$$R = 16'6 \cdot D^{0.475} \quad (\text{Paulhus, 1965}) \quad (0a)$$

$$p = 6'75 \cdot d^{0.49} \quad (\text{Galmarini, 2004}) \quad (0b)$$

Donde la lluvia R está en pulgadas y p en mm, mientras que la duración D está en horas y d en segundos. Es fácil comprobar que las dos expresiones son aproximadamente equivalentes, pues si realizamos un cambio de unidades en Paulhus (1965) obtenemos

$R(\text{mm}) = 8'6 \cdot D(\text{s})^{0.475}$, lo cual es del mismo orden que Galmarini (2004).

Si comparamos la curva de pluviosidad mundial de Paulhus con la curva de los récords de la zona mediterránea española, vemos que para la escala temporal de 12-36h se aproximan entre sí (Armengot 1994), ya que esa es la duración típica de un episodio de lluvias eficientes en el este peninsular, popularmente conocido como “lluvias de Gota Fría”.

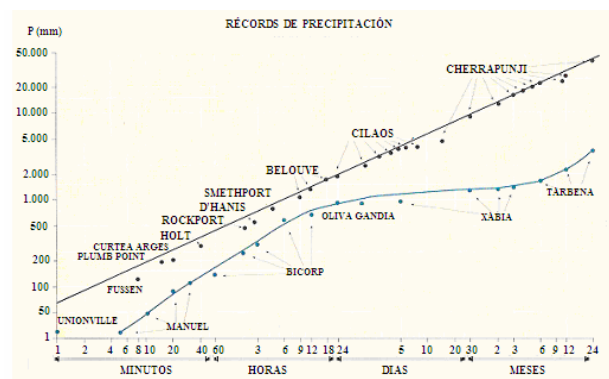


Figura 1. Comparación entre los récords mundiales de precipitación según Paulhus (1965) y los récords de precipitación de la Comunidad Valenciana según Armengot y Pérez Cueva (1994).

La ley empírica de Jennings-Paulhus (1950-1965) y otros (0), puede justificarse mediante la ley conceptual de la *atenuación de la intensidad media máxima* (1), que explicaremos más adelante.

El concepto de *atenuación de la intensidad media máxima* en función del tiempo de promedio se justifica teóricamente por el hecho de que una precipitación intensa se caracteriza esencialmente por tres fases: maduración, derrumbamiento y disipación (Byers y Braham, 1949). Suponiendo una velocidad de propagación-evolución constante para cada sistema de precipitación, la duración relativa de las fases es aproximadamente independiente de la velocidad y por tanto de la duración total. Por ello cabe esperar que exista **una ley general que sea independiente de la duración de los episodios.**

Por otra parte, sabemos que las precipitaciones alcanzan su máximo durante el derrumbamiento de las nubes (Rogers, 1976), por tanto cabe esperar una atenuación de la intensidad en función del tiempo, centrado en

dicho máximo, que se corresponderá con las fases de maduración y disipación.

2. Metodología.

La distribución relativa, respecto al tiempo de promedio, de todas las **Intensidades Medias Máximas (IMM)** de la precipitación viene dada aproximadamente en función únicamente del exponente n de la curva de atenuación de la intensidad (Moncho, 2008).

$$\bar{I} = \bar{I}_o \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \quad (1)$$

Donde I es la IMM en t minutos y I_o es la IMM en t_o minutos, y n es un parámetro ajustable a los datos. De este modo, para clasificar cuantitativamente una precipitación, necesitaremos teóricamente tres parámetros:

- Una intensidad media máxima de referencia cualquiera, $I_o(t_o)$
- La duración del chubasco asociado a un máximo relativo de intensidad, $\{ t_{in}, t_{fin} \}$
- La variabilidad de la intensidad, según el valor del exponente n

Así pues, queremos clasificar la precipitación según la **variabilidad de la intensidad**, y para ello nos fijaremos en el exponente de la curva de Intensidad Media Máxima.

En la siguiente tabla podemos resumir varios tipos de precipitación según la variabilidad de la intensidad.

n	Tipo de curva	Intensidad	distrib. temporal
< 0'2	Muy Suave	Práctica. constante	Muy regular
0'2 - 0'4	Suave	Débil. variable	Regular
0'4 - 0'6	Normal	Variable	Irregular
0'6 - 0'8	Pronunciada	Moderad. variable	Muy irregular
> 0'8	Muy pronunc.	Fuerte. variable	Casi instantáneo

Tabla 1. Clasificación de la lluvia según la regularidad de la intensidad

Esta clasificación es independiente de la intensidad máxima absoluta, de tal modo que se centra en describir **cuánto de constante es la intensidad de las precipitaciones**, pudiendo tomar valores entre 0 y 1, ambos excluidos. De este modo, podemos encontrar precipitaciones poco o muy intensas, tanto de intensidad constante como muy variable.

En general las precipitaciones presentan un índice n entre 0'1 y 0'7, siendo habitual 0'3-0'5 para las precipitaciones que dejan registros totales más elevados.

Como ejemplo tenemos la situación de lluvias de *gota fría* que afectó la Comunidad Valenciana entre los días 11 y 13 de octubre de 2007.

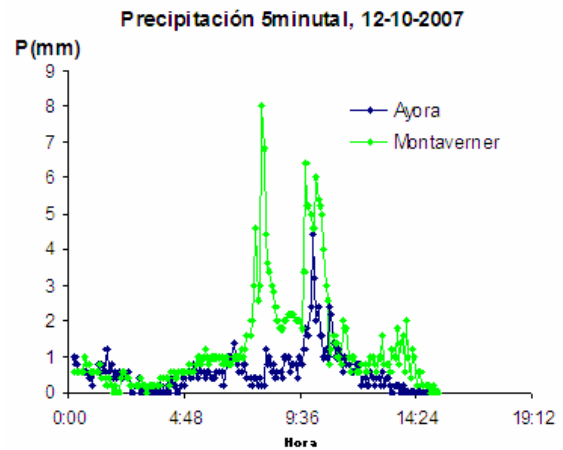


Figura 2. Precipitación 5-minutal registrada en las estaciones de Ayora y Montaverner de la red del SAIH-CHJ, el día 12 de octubre de 2007. El máximo 5-minutal de Montaverner se corresponde con las 08:00h y el de Ayora a las 10:05h.

Usando el *método de la intensidad contigua* (Moncho, 2008) y ajustando a la ley (1) se llega que:

$$\begin{array}{lll} \text{Montaverner} & n = 0'34 & I_o = 1'8 \text{ mm/1min} \\ \text{Ayora} & n = 0'32 & I_o = 0'93 \text{ mm/1min} \end{array}$$

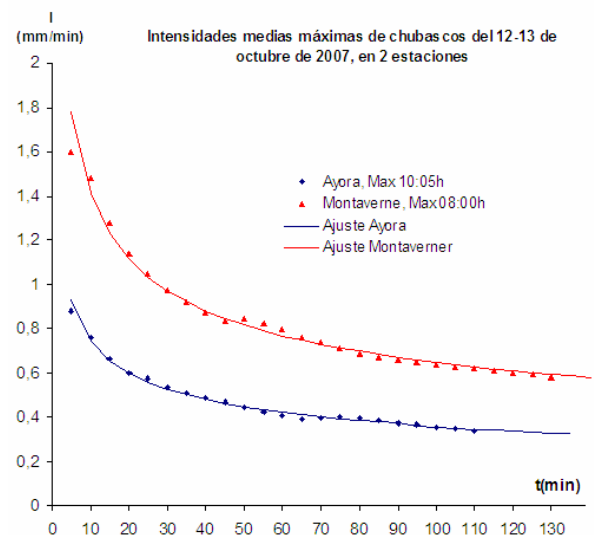


Figura 3. Curva ajustada a la distribución de la **intensidad media máxima** respecto al **tiempo de promedio** para las estaciones de Ayora y Montaverner de la red del SAIH-CHJ, correspondiente al día 12 de octubre de 2007. El máximo 5-minutal se produjo a las 08:00h en Montaverner y a las 10:05h de Ayora.

Podemos observar que para el tiempo de promedio $t = 5$ minutos la intensidad medida está por debajo de la intensidad del ajuste. Eso se debe a que el ajuste representa intensidades máximas, mientras que el valor medido para 5 minutos está obligado a contenerse en un intervalo concreto que no tiene por qué coincidir con el máximo real, sino que éste podría estar contenido entre dos particiones distintas de 5 minutos asignadas por el instrumento:

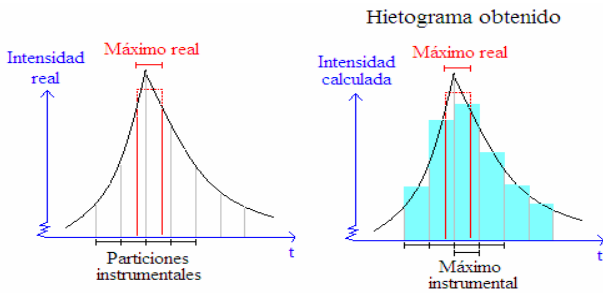


Figura 4. Diferencia gráfica entre un máximo real de intensidad y un máximo calculado a partir de los registros de un instrumento de medida. La partición finita en intervalos de tiempo contrasta con la continuidad de una precipitación real.

En situaciones de gota fría, donde encontramos cierta persistencia de las precipitaciones intensas, el índice n típico es $0.3-0.4$. Por otro lado, en situaciones de tormentas aisladas, las precipitaciones intensas se concentran en un intervalo reducido de tiempo, por lo que el índice n típico es $0.5-0.7$.

Según la frecuencia de un tipo de situación pluviométrica o de la otra, el índice n promedio local será una propiedad del clima de cada zona, por tanto el registro total de una precipitación local dependerá básicamente de la duración del episodio y de la intensidad media a un tiempo dado.

Los récords locales de intensidad de precipitación, y en general las lluvias extraordinarias, se caracterizan por un período de retorno en base a las curvas IDF, por tanto, cabe esperar que la intensidad, a un determinado tiempo, venga en función de dicho período.

En cualquier caso, la distribución temporal relativa, n , es en general independiente de la intensidad y la duración (Moncho, 2008), por lo que deberíamos observar dicha regularidad del índice n en cualquier registro mundial, tanto si es extremo como si no lo es.

3. Curva global de intensidades máximas

Deseamos analizar la distribución temporal de las intensidades máximas a nivel mundial, y para ello necesitaríamos analizar, uno a uno, todos los récords para determinar si cumplen la ley de atenuación (1) y para comparar entre sí los índices n de los distintos récords, ajustados en cada caso para la duración efectiva de cada precipitación.

Por tanto, necesitaríamos comparar la intensidad de referencia $I_o(t_o)$, y el índice n de tal modo que cabría esperar una buena relación entre los distintos récords, ya que intuitivamente podemos pensar que **un récord de precipitación de cierta duración necesariamente ha de contener aproximadamente los récords de duración inferior**, o en todo caso registros muy próximos.

Sin embargo no disponemos de la información temporal detallada de cada récord, sino que sólo podemos usar los valores finales de cada uno de ellos, por lo que no podemos deducir las características individuales, en base a la ley (1).

Además, existe la dificultad de que muy probablemente el récord medido no se corresponda con el récord real mundial, tomaremos los datos disponibles en la bibliografía. En cualquier caso, la hipótesis de partida que usaremos, insistimos, es que todo récord engloba aproximadamente a los récords de duración menor, es decir, **inicialmente supondremos que siguen la misma ley (1)**.

Los datos de los que disponemos a día de hoy, según Thapliyal-Kulshrestha (1992)¹, Paulhus (1965)², Barry (1985)³, WMO (1995⁴, 2007⁵), MeteoSwiss (2007)⁶ entre otros son los siguientes:

1 min:	38,1 mm.	Barot (Guadalupe) ⁶	26/11/1970
8 min:	126 mm.	Füssen (Alemania) ²	25/05/1920
15 min.	198 mm.	Plumb Point (Jamaica) ²	12/05/1916
20 min.	206 mm	Curtea-de-Arges (Romanía) ²	07/07/1889
30 min.	280 mm	Sikesgougou, Hebei (China) ⁴	03/07/1974
42 min.	305 mm.	Holt, Misuri (EEUU) ⁴	22/06/1947
60 min.	401mm	Shangdi, Inner Mongolia (China) ⁴	03/07/1975
72 min.	440 mm	Gaoj, Gansu, (China) ⁴	12/08/1985
2h	489 mm	Yujiawanzi, Inner Mongolia (China) ⁴	19/07/1975
2'5h	550 mm	Bainaobao, Hebei, China ⁴	25/06/1972
3h	600 mm	Duan Jiazhuang, Hebei (China) ⁴	28/07/1977
6 h	840 mm	Muduocaidang, Inner Mongolia ⁴	01/08/1977
10 h.	1400 mm	Muduocaidang, Inner Mongolia ⁴	01/08/1977
12 h.	1144 mm.	Foc-Foc, (Reunión) ⁴	7-8/01/1966
18 h	1589 mm	Foc-Foc, (Reunión) ⁴	7-8/01/1966
20 h	1697 mm	Foc-Foc, (Reunión) ⁴	7-8/01/1966
22 h	1780 mm	Foc-Foc, (Reunión) ⁴	7-8/01/1966
24 h.	1825 mm	Foc-Foc, (Reunión) ⁴	7-8/01/1966
18 h.	1689 mm	Belouve, La Reunión ⁴	28-89/02/1964
24 h.	1870 mm.	Cilaos (Reunión) ⁶	15-16/03/1952
2 d.	2467 mm	Aurère (Reunión) ⁴	8-10/01/1958
3 d.	3929 mm	Commerson (Reunión) ⁵	24-26/02/2007
4 d.	4869 mm	Commerson (Reunión) ⁵	24-27/02/2007
3 d.	3240 mm	Grand ilet (Reunión) ⁴	24-27/01/1980
4 d.	3721 mm	Cherrapunji (India) ⁴	12-15/09/1974
5 d.	3951 mm	Commerson (Reunión) ⁴	23-27/01/1980
6 d.	4303 mm	Commerson (Reunión) ⁴	22-27/01/1980
7 d.	4653 mm	Commerson (Reunión) ⁴	21-27/01/1980
8 d.	4936 mm	Commerson (Reunión) ⁴	20-27/01/1980
9 d.	5342 mm	Commerson (Reunión) ⁴	19-27/01/1980
10 d.	5678 mm	Commerson (Reunión) ⁴	18-27/01/1980
11 d.	5949 mm	Commerson (Reunión) ⁴	17-27/01/1980
12 d.	5051 mm	Commerson (Reunión) ⁴	16-27/01/1980
1 mes:	9300 mm.	Cherrapunji (India) ²	07/1861

2 mes:	12767 mm	Cherrapunji (India) ²	06-07/1861
3 mes:	16369 mm	Cherrapunji (India) ²	05-07/1861
4 mes:	18738 mm	Cherrapunji (India) ²	04-07/1861
5 mes:	20412 mm	Cherrapunji (India) ²	04-08/1861
6 mes:	22454 mm	Cherrapunji (India) ²	04-09/1861
1 año:	26461 mm	Cherrapunji (India) ²	8/1860 -7/1861
2 año:	40768 mm	Cherrapunji (India) ²	1860-1861

Podemos observar que los récords de 1 a 6 meses se engloban dentro del año récord, y muy probablemente, en el mes de julio de 1861, encontraríamos un día con casi 1800 mm, y a su vez, casi 1100 mm en 12h, casi 300 mm en 42 min, etc. Es decir, no parece descabellado suponer por ejemplo que durante algún minuto del mes de julio de 1861 en Cherrapunji se alcanzó un valor cercano al récord de Barot (38 mm en un minuto), tal y como proponemos como hipótesis de partida.

Vamos a intentar ajustar nuestra fórmula inicial para las intensidades medias máximas globales. Así pues, según Moncho (2008):

$$\bar{I} = \bar{I}_o \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \quad (1) \quad \rightarrow \quad \ln \frac{\bar{I}}{\bar{I}_o} = n \cdot \ln \frac{t_o}{t} \quad (7)$$

Tomando como referencia la intensidad de un minuto, $I_o(t_o) = 38,1$ mm, y representando los logaritmos, obtenemos un ajuste a la curva exponencial tal que:

n	corte	R ²
0,505	0,223	0,9962

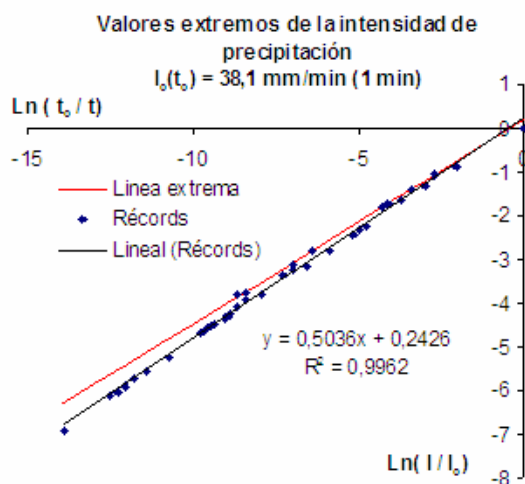


Figura 1. Distribución de las **intensidades máximas globales** respecto a la duración según Paulhus (1965) según los últimos datos disponibles (WMO, 2007 y otros), con una intensidad de referencia $I_o(t_o) = 38,1$ mm (1 min).

A pesar de que los **datos son independientes**, obtenemos una elevada correlación sobre los logaritmos ($R^2 = 0,9964$) y un exponente muy cercano a 0,5, lo cual nos hace pensar que la naturaleza de las

precipitaciones realmente se comporta de esa manera: **la intensidad de la lluvia se atenúa de forma continua en función del tiempo de promedio**, según la ley (1).

Es al menos curioso que, siendo precipitaciones extremas, el exponente de atenuación sea justamente 0,5, en contra de lo que pudiéramos pensar “por sentido común” de que debería mostrar un exponente extremo, cercano a uno. Y eso corrobora la **independencia entre intensidad de referencia (I_o), regularidad (n) y la duración (t)**.

Podríamos entender que todas esas precipitaciones son en realidad del mismo tipo en cuanto a **n** y en cuanto a **intensidad máxima de referencia**, pero son distintas en principio cuanto a **duraciones totales**. Por tanto, podemos construir una “curva de intensidad máxima global”:

$$\overline{I(t)} = \frac{48mm}{\min} \left(\frac{\min}{t} \right)^{0,5} \quad \rightarrow \quad P(t) = 48mm \left(\frac{t}{\min} \right)^{0,5} \quad (8)$$

Por otro lado, si trazamos una línea extrema (en **rojo**) sobre los valores que sobresalen del ajuste, podemos observar que destaca especialmente 1 récord, que en base a la ley (1) se sitúa por encima de cualquier otro, se trata del máximo de 4 días, correspondiente a los días 24-27 de febrero de 2007 en Commerson (La Reunión), con 4869 mm. Por otro lado, entre los días 24 y 26 de febrero del mismo año cayeron 3929 mm, pero no sería extraño que entre los días 24 y 27 encontrásemos 72h con un registro algo superior. **En cualquier caso el récord de 4869 mm en 4 días supone el récord mundial absoluto hasta la fecha** ya que si lo traducimos a intensidad máxima de un minuto según la ley (1) obtenemos que le corresponden hasta **64 mm en un minuto** (ver tabla 2), mientras que en promedio la intensidad máxima en un minuto es 47 ± 5 mm /1min.

t(min)	P(mm)	I (mm/1min)
1 min:	38,1	38,1
8 min:	126	44,5
15 min:	198	51,1
20 min:	206	46,1
30 min:	280	51,1
42 min:	305	47,1
60 min:	401	51,8
72 min:	440	51,9
2h	489	44,6
2h 30 min	550	44,9
3 h	600	44,7
6 h	840	44,3
10 h:	1400	57,2
12 h:	1144	42,6
18 h	1589	48,4

18,5 h	1689	50,7
24 h.	1870	49,3
2d	2467	46,0
3 d.	3929	59,8
4 d.	4869	64,2
4 d.	3240	49,3
5 d.	3721	49,0
6 d.	3951	46,6
7 d.	4303	46,3
8 d.	4936	46,0
9 d.	5342	46,9
10 d.	5678	47,3
11 d.	5949	47,3
12 d.	6051	46,0
1 mes:	9300	44,0
2 mes:	12767	43,1
3 mes:	16369	45,0
4 mes:	18738	44,7
5 mes:	20412	43,5
6 mes:	22454	43,7
2 año:	40768	39,8

Tabla 2. Intensidad máxima minatural, $I(\text{mm}/\text{lmin})$, equivalente para cada récord según la ley (1), con un índice $n = 0,5$. Dicho valor representa la precipitación máxima en un minuto estimada para cada récord.

Del mismo modo, parece razonable que el 1 de agosto de 1977, en Muduocaidang (Inner Mongolia, China), se registrasen más de 840 mm en 6h, ya que se tiene constancia de que en el mismo día se recogieron 1400 mm en 10h, y en ambos casos suponen una *Intensidad Media Máxima* de 2'333 mm/min, lo cual sólo es posible con índice $n = 0$. Por tanto, suponiendo que n no fue 0 (ya que estadísticamente es imposible), cabe esperar que en 6h se registraran más de 840 mm (suponiendo un índice bajo de 0'3, se habrían registrado realmente unos 980 mm en 6h).

Si ahora comparamos los récords registrados mundialmente con el ajuste y la envolvente extrema, encontramos los valores representados en la Tabla 3:

Duración	P(mm)			A-R (%)	E-R (%)
	Récords	Ajuste	Extremo		
1	38,1	48	47	27	18
8	126	136	141	8	11
15	198	186	198	-6	0^r
20	206	214	230	4^a	11
30	280	262	286	-6	2^r
42	305	309	342	1^a	12

60	401	369	414	-8	4^r
72	440	404	456	-8	4^r
120	489	521	599	7	21
150	550	582	675	6	22
180	600	637	744	6	23
360	840	899	1077	7	26
600	1400	1159	1414	-17	1^r
720	1144	1268	1559	11	33
1080	1589	1551	1935	-2^a	22
1110	1689	1554	1935	-7	18
1440	1870	1790	2256	-4^a	22
2880	2467	2525	3265	2^a	32
4320	3929	3088	4054	-21^v	4^r
5760	4869	3562	4726	-27^v	-4^r
4320	3240	3088	4054	-5	26
5760	3721	3562	4726	-4^a	28
7200	3951	3979	5324	1^a	34
8640	4303	4356	5867	1^a	36
11520	4936	5025	6840	2^a	38
12960	5342	5328	7284	0^a	36
14400	5678	5614	7705	-1^a	36
15840	5949	5886	8107	-1^a	37
17280	6051	6146	8492	2^a	40
44640	9300	9845	14089	6	49
87840	12767	13778	20215	8	54
132480	16369	16896	25169	3^a	52
175680	18738	19437	29258	4^a	54
220320	20412	21750	33014	7	58
263520	22454	23772	36323	6	58

Tabla 3. Comparación entre los récords de precipitación, el ajuste de la curva de intensidad máxima, y la envolvente de precipitaciones extremas, generada por los datos de 15 minutos, 3 y 4 días.

De los 33 récords mundiales, podemos observar aproximadamente 15 con una diferencia menor o igual al 4% (**azul^a**) respecto al ajuste del modelo. Así mismo destacan 2 récords, los de Commerson (Reunión), 24-27/02/2007, que superan en más del 20% el ajuste del modelo (**violeta^v**).

Si trazamos una curva que envuelva dichos dos récords, podemos observar que 5 récords más de los 33 se aproximan mucho a dicha curva (**rojo^r**). Llamaremos curva extrema a dicha envolvente.

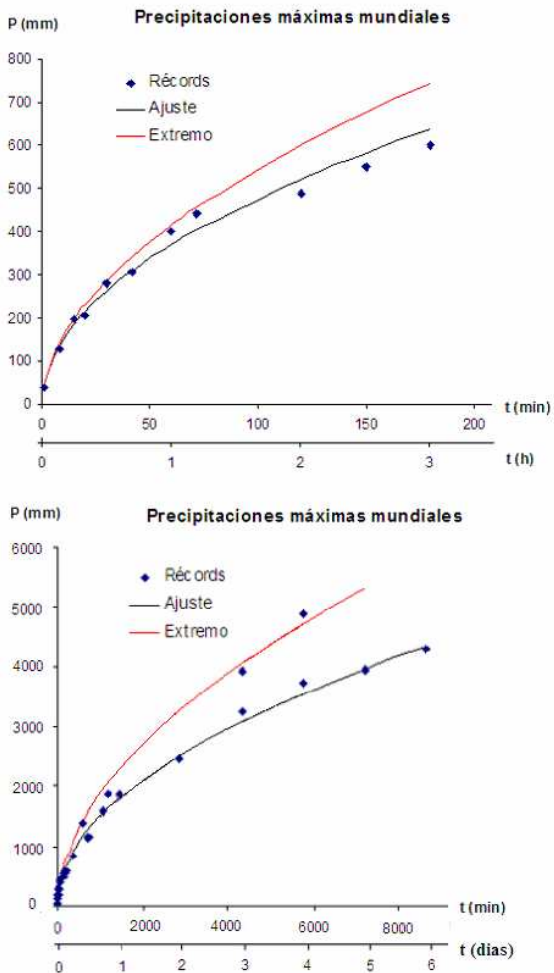


Figura 3. Curva ajustada a los récords mundiales de precipitación máxima respecto a la duración, según los últimos datos disponibles (WMO, 2007 y otros). Y envolvente extrema con $n = 0.47$ de los récords más significativos (para 3 y 4 días).

Si prolongamos analíticamente la curva envolvente de los dos récords del año 2007 (Commerson, La Reunión, 24-27 de febrero) hasta 6 meses vemos que la diferencia es muy grande respecto a la curva ajustada.

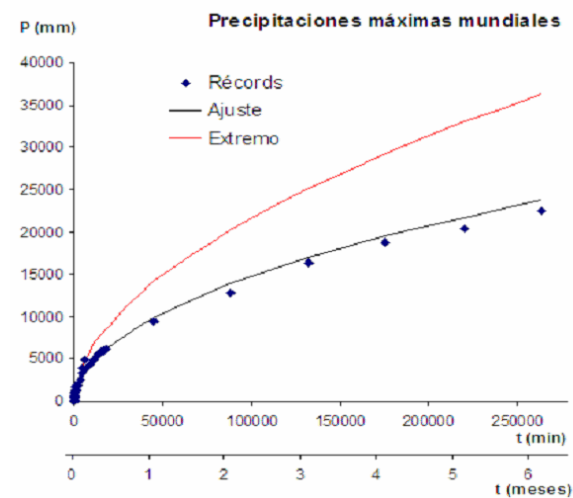


Figura 4. Comparación entre la curva ajustada a los récords mundiales (WMO, 2007 y otros) y la envolvente extrema prolongada hasta 6 meses.

Por otra parte podríamos pensar que los récords mundiales cumplen la ley (1) conjuntamente y no por separado, sin embargo es fácil ver que si cogemos los datos por separado de algunas estaciones con registros récords, éstos también cumplen la ley de atenuación.

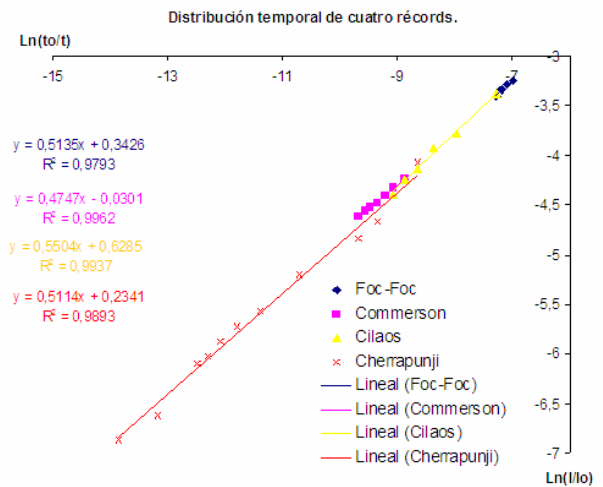


Figura 4. Distribución temporal de cuatro récords por separado: Foc-Foc (7-8/01/1966, Reunión), Commerson (16-27/01/1980, Reunión), Cilaos (15-16/03/1952, Reunión), Cherrapunji (1860-1861, China).

4. Aplicación para la climatología regional

La isla de La Reunión ha superado distintos récords mundiales de precipitación en unas 6 ocasiones desde 1952 hasta 2007, lo que la convierte en el principal punto de interés en esta materia. La isla está situada en el Océano Índico, al este de Madagascar y tiene una extensión de 63 km de este a oeste y 45 de norte a sur. El clima es muy variable debido a los importantes accidentes geográficos (picos de más de 3000 metros).

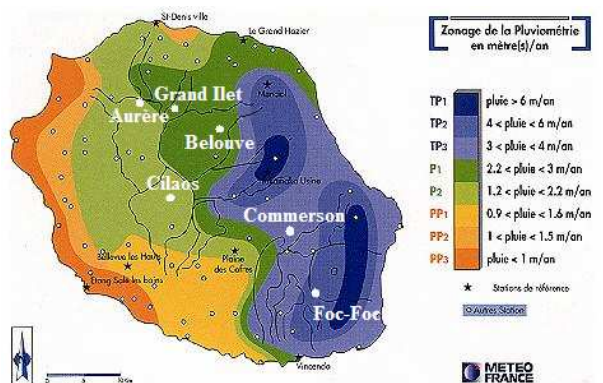


Figura 5. Distribución geográfica de las precipitaciones anuales de la isla de La Reunión. Fuente: MeteoFrance.

Los puntos donde se han registrado algunos de los récords mundiales son:

	Latitud (°)	Longitud (°)
Cilaos	-21.117	55.467
Belouve	-21.033	55.55
Commerson	-21.183	55.650
Aurère	-21.000	55.433
Grand Ilet	-21.017	55.483
Foc-Foc	-21.276	55.693

Aunque el valor medio de la precipitación anual sea distinta, supondremos que la climatología de los 6 puntos sólo se difiere por la frecuencia de las precipitaciones, por lo que más adelante aproximaremos la misma curva IDF para todos los puntos.

Hemos observado que los récords mundiales cumplen que $n = 0.50 \pm 0.03$, y que la principal diferencia entre ellos es la duración. Sin embargo existe una pequeña diferencia en el valor de la intensidad de referencia dada por la **Tabla 2**. Podemos asociar esas diferencias de la intensidad a la componente de variabilidad intrínseca del clima de cada zona, es decir, a la estadística de los períodos de retorno.

Por tanto, la batibilidad de un récord mundial en un punto viene dada por la curva IDF correspondiente asignando $n = 0.50 \pm 0.03$ y tomando como intensidad de referencia $I(t_o, p_o)$ la máxima correspondiente a cada estación, según la **Tabla 2**. Según Moncho (2008), la mejor forma de expresar una curva IDF es según la expresión general:

$$I(t, p) \approx I(t_o, p_o) \left(\frac{p}{p_o} \right)^m \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \quad (9)$$

Con esto, tomaremos los valores máximos de intensidad para una misma zona, en este caso consideraremos 6 puntos distintos muy próximos entre sí, por lo que la curva IDF representará a dicho conjunto de puntos y no sólo a un único punto. Escogiendo los siguientes valores de la **Tabla 2**:

Año	Referencia (n=0.5)	Récord
1952 (Cilaos)	49.3 mm/1min	1870 mm / 1d
1958 (Aurère)	46.0 mm/1min	2467 mm / 2d
1964 (Belouve)	50.7 mm/1min	1687 mm/18.5h
1966 (Foc-Foc)	48.4 mm/1min	1589 mm / 18h
1980 (Grand Ilet)	49.3 mm/1min	3240 mm / 3d
2007 (Commerson)	64.2 mm/1min	4869 mm / 4d

Aplicando la aproximación más sencilla sobre períodos de retorno, $p(I) = \overline{p_i(I_i \geq I)}$ para el conjunto de las 6 estaciones, y ajustando dichos valores a la expresión (9), estimamos que el exponente m es del orden de $m = 0.12 \pm 0.02$. Por tanto, **la curva IDF del récord global** asociada a los 6 puntos de referencia de la isla La Reunión es aproximadamente:

$$I(t, p) \approx 48 \text{ mm / min} \left(\frac{p}{10a} \right)^{0.12 \pm 0.02} \left(\frac{1 \text{ min}}{t} \right)^{0.50 \pm 0.03} \quad (10)$$

5. Conclusiones

En primera aproximación, **lo único que distingue** a los récords mundiales de precipitación **es la duración de la lluvia**, ya que comparten el mismo exponente y aproximadamente la misma intensidad de referencia.

Hemos obtenido una expresión matemática que ajusta los récords mundiales pluviométricos, es decir, en promedio los récords mundiales se ajustan a la

expresión (8) por lo que representa un umbral empírico de la cota máxima de una precipitación:

$$P(t) = (48 \pm 4) \text{ mm} \left(\frac{t}{\text{min}} \right)^{0.5} \quad (8)$$

Donde $P(t)$ es la precipitación acumulada en t minutos.

Los récords mundiales no sólo cumplen la ley en su conjunto, sino también por separado. Cada récord presenta una distribución temporal, entre un momento inicial y uno final, en los que cumplen dicha ley.

El récord absoluto mundial hasta la fecha se corresponde con 4869 mm en 4 días ya que se sitúa por encima de cualquier curva que envuelva el resto de récords. Asumiendo que las precipitaciones extremas mundiales en general cumplen que $n = 0.5$, entonces es probable que durante dicho récord hubo un minuto en el que se alcanzaron en torno a 63 ± 5 mm. Por tanto cabe esperar que la curva de dicha récord fuese:

$$P(t) = (63 \pm 5) \text{ mm} \left(\frac{t}{\text{min}} \right)^{0.5} \quad (11)$$

Algunos récords de duración inferior a cuatro días se aproximan a dicha curva, lo cual hace pensar que probablemente en un futuro se registren más récords cercanos a dicha curva, tanto a una escala temporal inferior como a una escala temporal superior.

Por otra parte, la ley de atenuación de la intensidad no es un simple patrón matemático empírico que funciona para los extremos mundiales de precipitación, sino que se trata de una ley aplicable a cualquier registro continuo de precipitación, con un máximo marcado, ya que presenta una justificación conceptual sobre la fenomenología de las precipitaciones.

$$I = I_o \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \quad (1)$$

Además, la ley de atenuación de la intensidad es una curva explícitamente “bien comportada”, puesto que la referencia $I_o(t_o)$ puede ser cualquier punto. Por tanto dicha expresión es más sencilla que las alternativas ya que presenta un único parámetro, n , independiente de la referencia.

Por último, dicha ley se puede aplicar también al factor “duración” de las curvas IDF, de tal modo que podemos estimar la batibilidad de un récord mundial en una cierta región, como por ejemplo La Reunión, donde hemos estimado una curva IMM-IDF aproximada tal que:

$$I(t, p) \approx 48 \text{ mm / min} \left(\frac{p}{10a} \right)^{0.12 \pm 0.02} \left(\frac{1 \text{ min}}{t} \right)^{0.50 \pm 0.03} \quad (10)$$

Donde I es la intensidad, p es el período de retorno y t es el tiempo.

6. Bibliografía

ARMENGOT-SERRANO R. (1994): Las precipitaciones extraordinarias. En: A. Pérez Cueva (Dir.) Atlas climàtic de la Comunitat Valenciana. Conselleria d'Obres Públiques,

Urbanisme i Transports. Generalitat Valenciana, Col·lecció Territori, N° 4, 98-99.

BARCENA ODRIOZOLA, P Y PACHECO IBARS, S. (1995): Precipitaciones excepcionales en Cantabria. Distribución espacial y consecuencias. In CREUS NOVAU, J. (Ed.). *Situaciones de riesgo climático en España*. Jaca: Instituto Pirenaico de Ecología, p. 117-128.

BARRY, R., G. y CHORLEY, R. J. (1985): *Atmósfera, tiempo y clima*. Ed. Omega, S. A. p 120.

BYERS, H. R. and BRAHAM, Jr. R. R. (1949): *The Thunderstorm*. U.S. Dept. of Commerce. Washington D.D. 287 pp.

CAMARASA BELMONTE, A.M. (1991): La intensidad de las lluvias extremas mediterráneas a partir de la red S.A.I.H. In *XII Congreso Nacional de Geografía*. Valencia: Universidad de Valencia y Asociación de Geógrafos Españoles, p. 127-134.

ELÍAS, F. y RUIZ, L. (1994): *Precipitaciones máximas en España*. Madrid: ICONA, 1979. 545 p.

FERRER POLO, F.J. y ARDILES, L.: *Análisis estadístico de las series anuales de máximas lluvias diarias en España*. Ingeniería Civil, n1 95, p. 87-100.

GALMARINI, S., STEYN, D. G., AINSLIE, B. (2004) *The scaling law relating world point-precipitation records to duration*. International Journal of Climatolog, n1 24, p. 533-546.

GIBERGANS, J., LLASAT, M.C. y MARTÍN VIDE, J. (1995): *Precipitaciones extremas en el área mediterránea*. Riegos y Drenajes, vol. XXI, p. 27-34.

LÓPEZ GÓMEZ, A. (1989) Aguaceros extraordinarios e inundaciones en la costa mediterránea española (1957-1982). In GIL OLCINA, A. y MORALES GIL, A. (Eds.). *Avenidas fluviales e inundaciones en la cuenca del Mediterráneo*. Alicante: Instituto Universitario de Geografía de la Universidad de Alicante y Caja de Ahorros del Mediterráneo, p. 31-50.

MONCHO, R (2008). *Análisis de la intensidad de precipitación. Método de la intensidad contigua*. RAM3, enero 2008.

MONCHO, R., BELDA, F. y CASELLES V. (2008). *Estudio climático del exponente N de las curvas IDF. Aplicación para la Península Ibérica*. Tethys.

MARTÍN VIDE, J. (2002) Las lluvias máximas diarias. In AYALA-CARCEDO, F.J. y OLCINA CANTOS, J. (Coords.). *Riesgos naturales*. Barcelona: Ariel, p. 913-920.

PAULHUS, J. L. H. (1965): *Indian Ocean and Taiwan rainfalls set new records*. Monthly Weather Review, 93(5), pp. 331-335.

PÉREZ CUEVA, A. J. (1983): "Precipitaciones extraordinarias en España peninsular. *Agricultura y Sociedad*, n1 28, p. 189-203.

ROGERS, R. R. (1976): *Física de nubes*. Ed. Reverté.

THAPLIYAL V and KULSHERSTHA M. (1992): Which is the rainiest place in the world, *Mausam*, 43(3), pp. 331-332.

7. Agradecimientos

Agradecemos la colaboración del Instituto Nacional de Meteorología por poner a disposición los artículos

necesarios para elaborar el estudio comparativo de las referencias a extremos globales de la precipitación.

Así mismo se agradece también la colaboración de la Confederación Hidrográfica del Júcar que, a través del programa Sistema Automático de Información Hidrográfica, ha cedido los datos necesarios para elaborar la primera parte del estudio que aquí se expone.