



Universidad de Córdoba

Seminario Internacional

EL AGUA : gestión técnica y ambiental para la sustentabilidad productiva del país

Talca (Chile) Enero 2012

Estudio de la erosividad de la lluvia en Andalucía Oriental

José Luis Ayuso

Estudio de la Erosividad de la Lluvia en Andalucía Oriental

Área de estudio



Rasgos comunes del régimen de las precipitaciones en la región:

- a) Presencia de frentes en el periodo de octubre a mayo
- b) Ocurrencia de lluvias de tipo convectivo a finales de verano y principios de otoño

Localización y variables climáticas de las estaciones climatológicas seleccionadas

Localidad	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Altitud (m)	Precip. Media Anual (mm)	T° Media Anual (°C)
Jaén (Cerro de los Lirios)	37° 46' 49"	03° 48' 27"	580	460	17,1
Málaga (Aeropuerto)	36° 40' 00"	04° 29' 17"	7	524	18,0
Granada (Aeropuerto)	37° 11' 24"	03° 46' 35"	570	357	15,1
Almería (Aeropuerto)	36° 50' 35"	02° 23' 17"	20	196	18,7

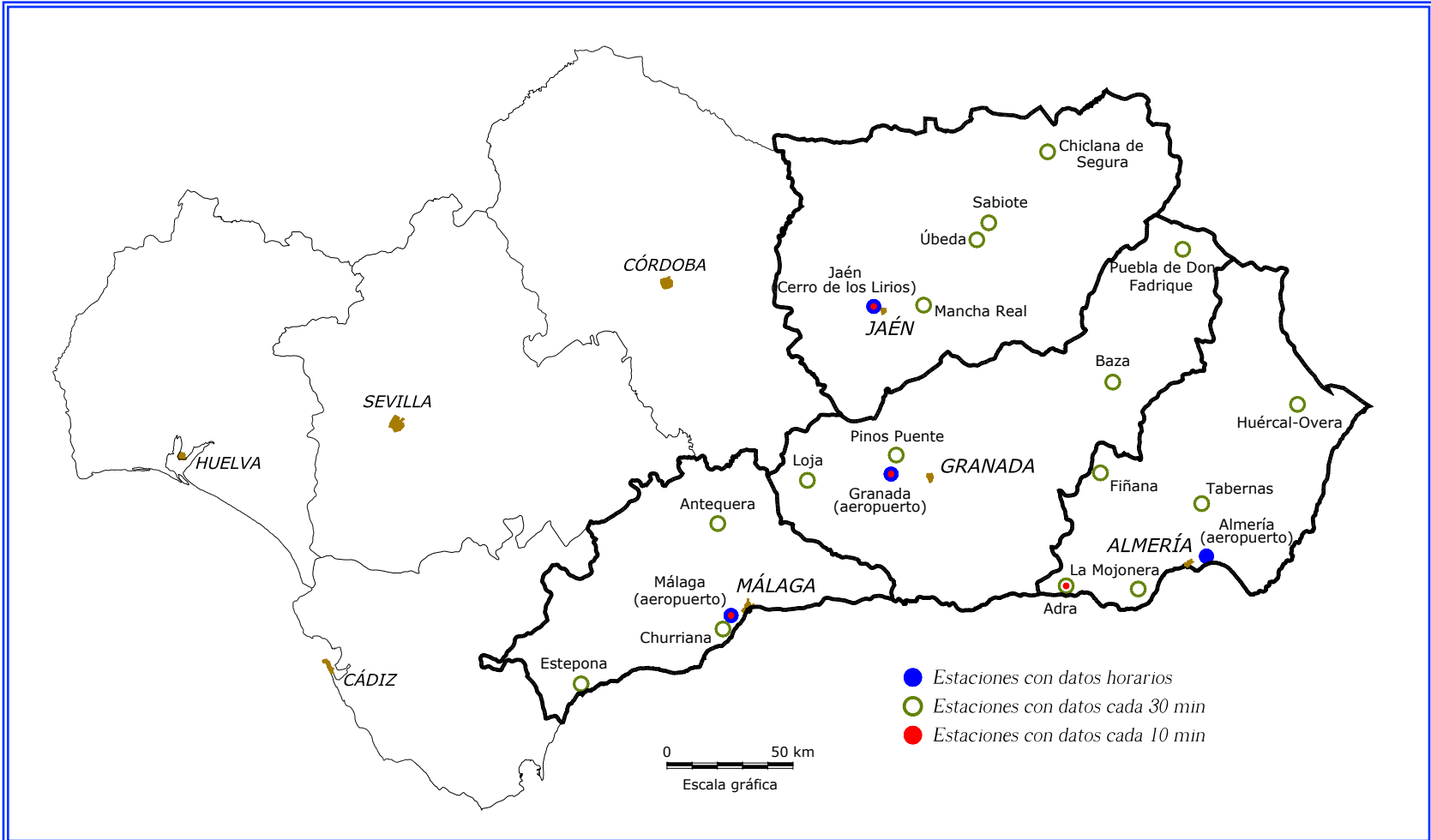
Valores de las precipitaciones medias mensuales y anuales en las cuatro capitales de Andalucía Oriental (Fuente AEMET)

Mes	Precipitaciones medias (mm)			
	Jaén (Cerro Lirios)	Málaga (Aeropuerto)	Granada (Aeropuerto)	Almería (Aeropuerto)
	1989-2007	1971-2000	1972-2000	1971-2000
Ene	42	81	41	23
Feb	39	55	38	21
Mar	57	49	30	15
Abr	48	41	38	20
May	44	25	28	14
Jun	16	12	17	10
Jul	2	2	4	1
Ago	8	6	3	1
Sep	32	16	16	12
Oct	46	56	42	28
Nov	59	95	48	28
Dic	67	88	53	23
AÑO	460	524	357	196

Registros históricos

- Albuñol (Granada) 600 mm (19/10/1973)
- Larrasquitu (Vizcaya) 503 mm (31/8/1981)
- Bejis (Castellón) 140 mm. en una hora (14/10/1957)
- Cofrentes Valencia 426 mm (20/10/1982)
- Oliva (Valencia) 817mm. (3/11/1987).
- Sta.Cruz de Tenerife 129,9 mm en una hora (31/3/2002)

Localización de las estaciones pluviométricas



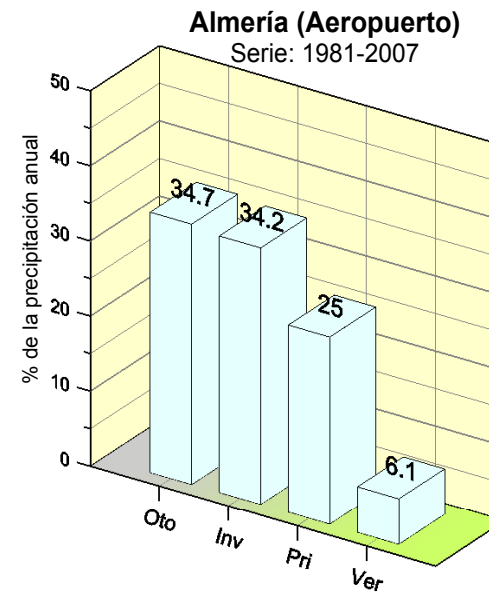
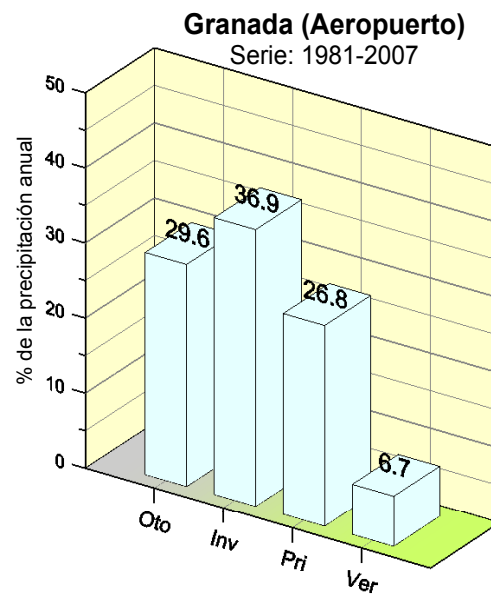
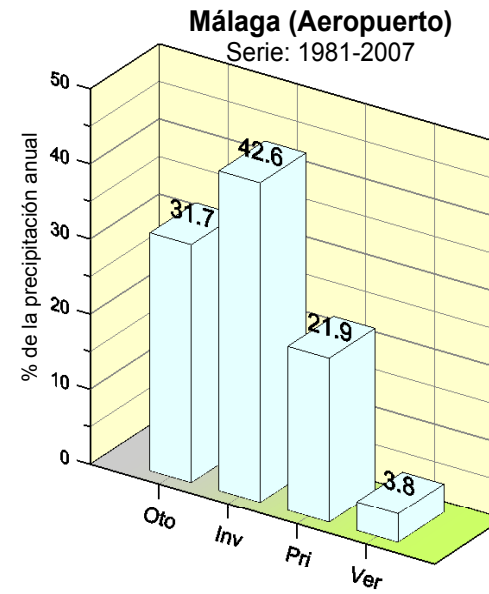
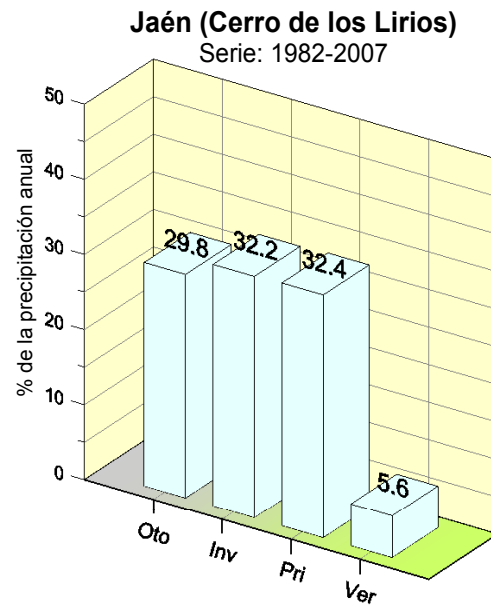
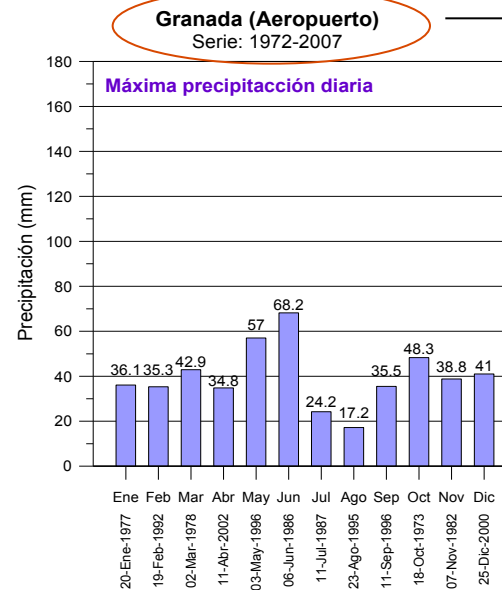
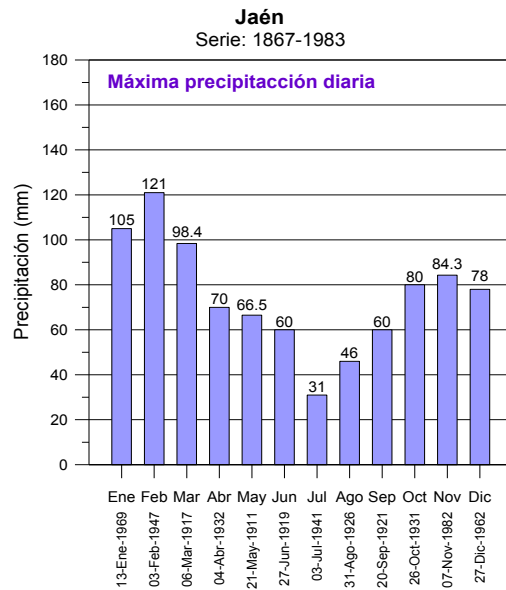
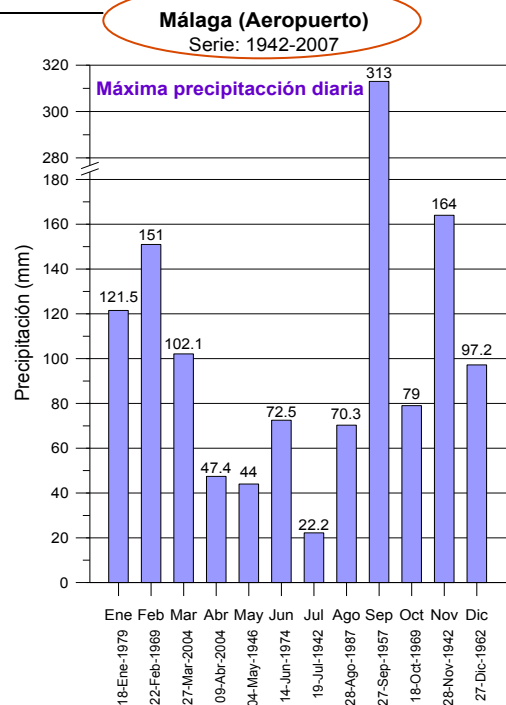


Figura 2.2 Distribución estacional de la precipitación anual (Fuente AEMET. Elaboración propia)

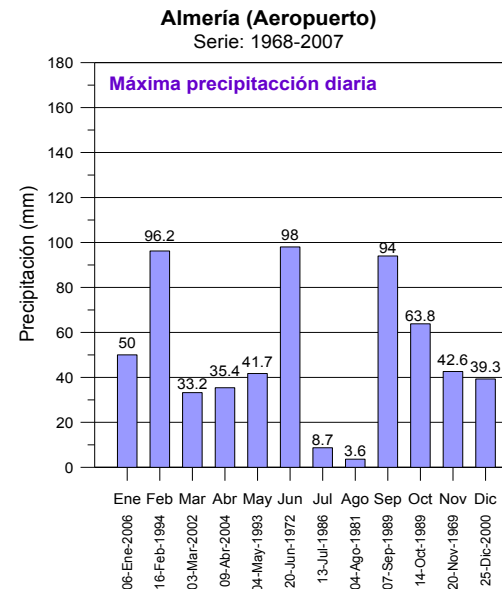
Precipitaciones Extremas Diarias



Precipitaciones extremas diarias más moderadas (< 70 mm).



Se registran 5 episodios de lluvia superiores a 100 mm



Erosividad de la lluvia en Andalucía Oriental

Metodología

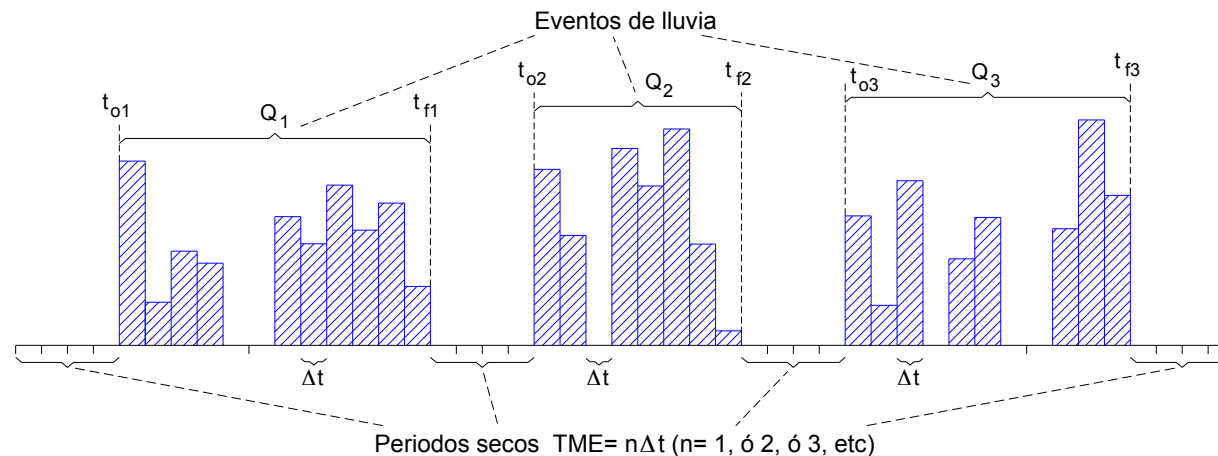
Estimación de la erosividad de la lluvia a distintas escalas:

- **1** Aguaceros individuales
- **2** Precipitación diaria (Relaciones P_d-EI_{30})
- **3** Precipitación anual (Relaciones P_a-EI_{30})

1 Estimación de la erosividad a escala de aguaceros individuales

Definición de evento de lluvia o aguacero

Aguacero \Rightarrow Lluvia caída en un intervalo de tiempo cuyo comienzo y final se define por un intervalo o periodo seco (sin lluvia) de una duración determinada, denominado **Tiempo Mínimo entre Eventos, TME**



En la identificación de aguaceros se ha seguido el siguiente proceso:

- 1 Especificación de un periodo seco o TME de una determinada duración \Rightarrow 1, 2, 3, ..., 6 h
- 2 Especificación adicional de alguno de los siguientes requisitos
 - a Un umbral de altura mínima de lluvia requerida para considerar el evento \Rightarrow ≥ 10 mm
 - b Una intensidad de lluvia mínima para un determinado periodo dentro del evento
 - $\geq 2,5$ mm en 10 min Para las series de 10 min
 - $\geq 7,5$ mm en 30 min Para las series de 30 min

Eventos de lluvia de las series de precipitación de 10 minutos de resolución temporal

Aguaceros identificados con datos de resolución 10 minutos, según el TME considerado en a separación de eventos

TME (h)	Estación			
	Jaén (Cerro Lirios) Serie 1995-2002	Granada (Aeropuerto) Serie 1995-2002	Málaga (Aeropuerto) Serie 1999-2002	Adra (C. Náutico) Año 2002
1	131	92	39	5
2	127	101	46	5
3	133	104	46	5
4	136	106	48	5
5	137	108	46	5
6	132	108	46	5
	796	619	271	30

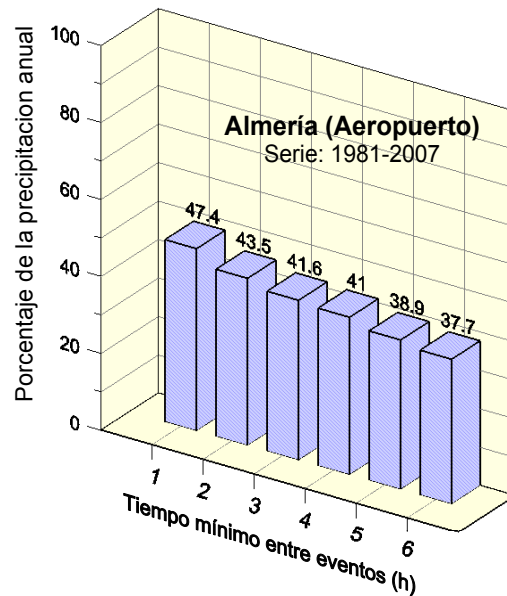
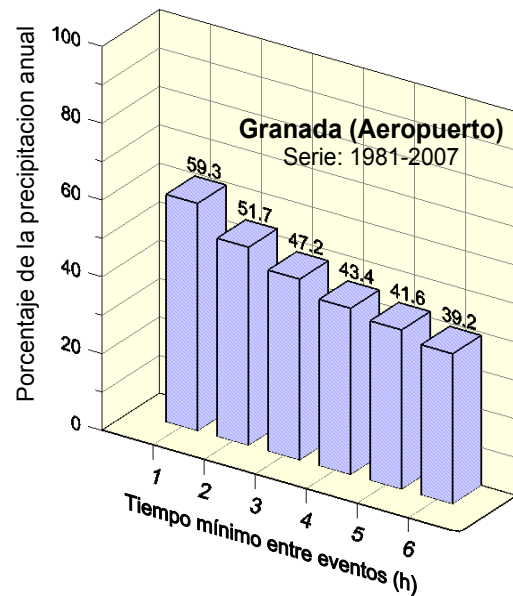
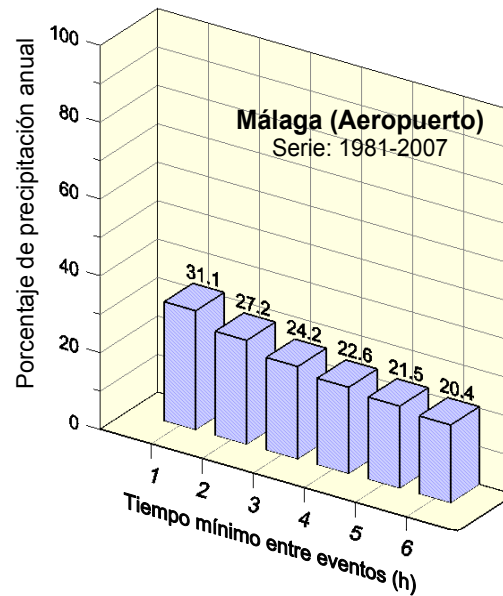
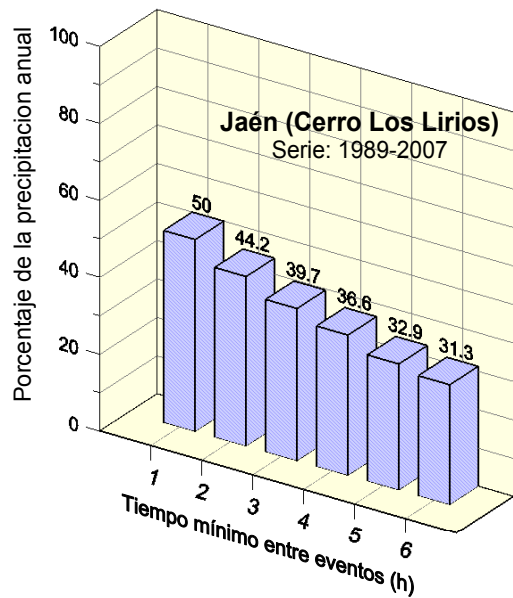
Aguaceros identificados, según el tiempo mínimo entre eventos (TME) considerado, en cada una de las estaciones

Duración Periodo Seco (h)	Años								Total Eventos
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	
Jaén (Cerro Lirios)									
1	8	27	31	6	13	17	19	10	131
2	7	25	31	6	13	17	18	10	127
3	8	25	32	6	13	17	18	14	133
4	9	25	30	9	13	17	18	15	136
5	9	25	30	9	13	17	19	15	137
6	10	24	29	9	13	17	16	14	132
Granada (Aeropuerto)									
1	5	18	19	5	8	15	13	9	92
2	5	21	22	5	10	13	13	12	101
3	6	22	21	6	12	13	13	11	104
4	6	24	21	6	12	13	13	11	106
5	6	24	21	6	12	13	13	13	108
6	6	26	21	6	12	13	12	12	108
Málaga (Aeropuerto)									
1					5	12	13	9	39
2					4	16	13	13	46
3					5	15	12	14	46
4					5	15	12	16	48
5					4	15	12	15	46
6					4	14	13	15	46
Adra (Club Náutico)									
1								5	5
2								5	5
3								5	5
4								5	5
5								5	5
6								5	5

Eventos de lluvia de las series de precipitación horaria de resolución temporal

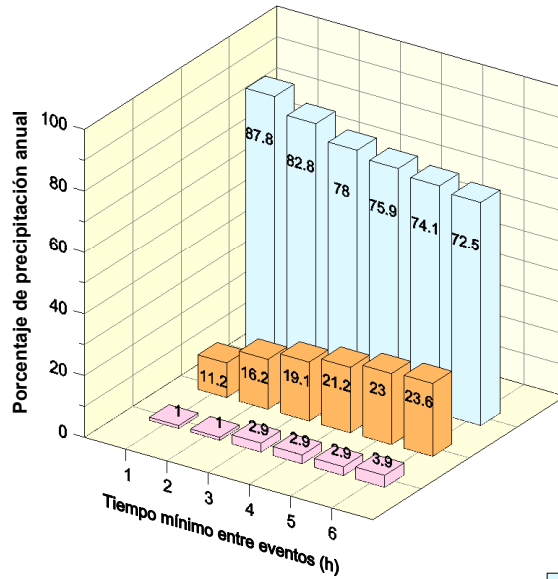
Número de eventos identificados según los diversos TME

TME	Intervalos de altura de precipitación			
	< 10 mm	10 a < 30 mm	30 a 60 mm	> 60 mm
Jaén (Cerro Los Lirios)				
1	2301	185	21	1
2	1743	190	31	1
3	1427	187	36	3
4	1235	189	39	3
5	1093	193	42	3
6	1001	191	44	4
Granada (Aeropuerto)				
1	3349	215	10	1
2	2593	240	17	1
3	2169	251	23	2
4	1908	260	27	2
5	1724	261	30	2
6	1562	263	32	2
Málaga (Aeropuerto)				
1	2062	250	65	20
2	1611	246	66	23
3	1370	235	72	25
4	1230	227	74	26
5	1131	224	76	27
6	1056	217	77	27
Almería (Aeropuerto)				
1	1405	94	24	2
2	1163	103	24	2
3	1044	104	25	2
4	977	103	26	2
5	906	108	26	2
6	855	108	27	2

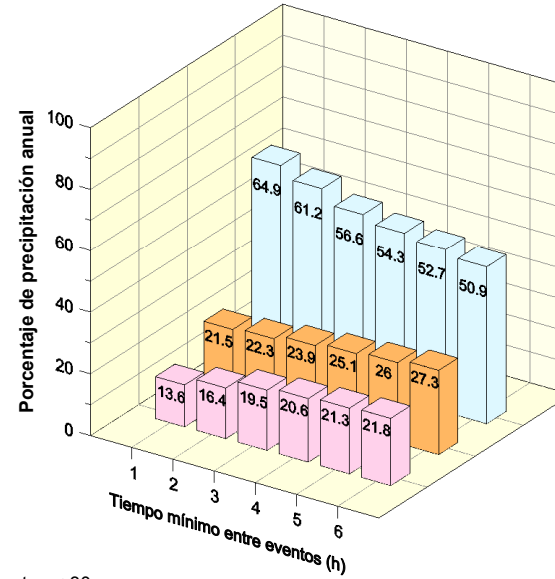


Porcentaje de la precipitación anual que representan los eventos con menos de 10 mm de lluvia según los diferentes TME considerados en su identificación.

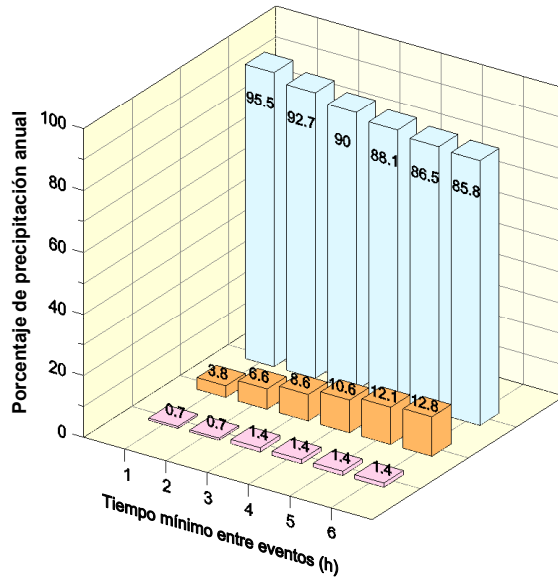
Jaén (Cerro Los Lirios)
Serie 1989-2007



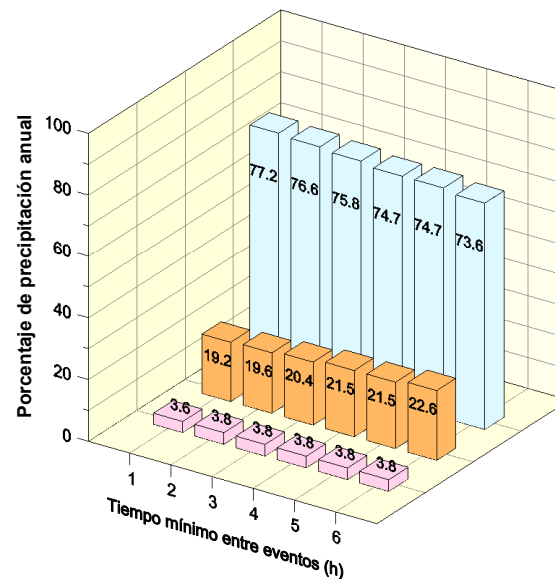
Málaga (Aeropuerto)
Serie 1981-2007



Granada (Aeropuerto)
Serie 1981-2007



Almería (Aeropuerto)
Serie 1981-2007

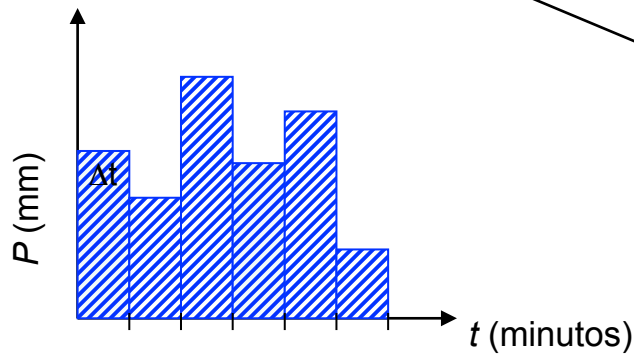


■ Eventos < 30 mm
■ Eventos de 30 to 60 mm
■ Eventos > 60 mm

Distribución de la precipitación anual según la intensidad de los aguaceros identificados con TME de 1 a 6 horas

Estimación de la erosividad R

$$E_{CT} = \sum_{i=1}^n E_c P_i \left(\frac{MJ}{ha} \right)$$



E_{CT} = energía cinética del aguacero (MJ/ha)
 n = número de pulsos del aguacero
 E_c = energía cinética (MJ/ha/mm) del pulso i del aguacero
 P_i = altura de lluvia (mm) del pulso i del aguacero

Expersión de Wischmeier y Smith (1978)

$$E_c = \begin{cases} 0,119 + 0,0873 \log I & I \leq 76 \text{ mm/h} \\ 0,283 & I > 76 \text{ mm/h} \end{cases}$$

I = intensidad del pulso de lluvia (mm/h)

Erosividad de un aguacero R

$$\left(\frac{MJ \text{ mm}}{ha \text{ h}} \right)$$



$$R = E_{CT} I_{30}$$

E_{CT} = energía cinética del aguacero (MJ/ha)
 I_{30} = intensidad máxima (mm/h) en 30 minutos registrada en el aguacero

La suma de la erosividad de cada una de las tormentas que se producen en el año es la erosividad anual

La erosividad a lo largo del año



$$R_{año} = \sum_{i=1}^n R_i \left(\frac{MJ \text{ mm}}{ha \text{ h}} \frac{1}{año} \right)$$

n = número de aguaceros acontecidos en el año
 R_i = Erosividad del aguacero i

Relaciones entre los índices de erosividad EI_{30} y EI_{60}

El cálculo preciso de la erosividad usando el índice EI_{30} requiere registros continuos de datos de lluvia, o registros de precipitación con, al menos, una resolución temporal de 30 minutos

⇒ ¡ Datos raramente disponibles !

Los datos de lluvia más ampliamente disponibles y con una buena cobertura espacio-temporal son los de resolución **horaria y diaria**

Con los datos de resolución 10 minutos se ha calculado, para cada aguacero

el índice $(EI_{30})_{10}$

$$(EI_{30})_{10} = (E)_{10} (I_{30})_{10}$$

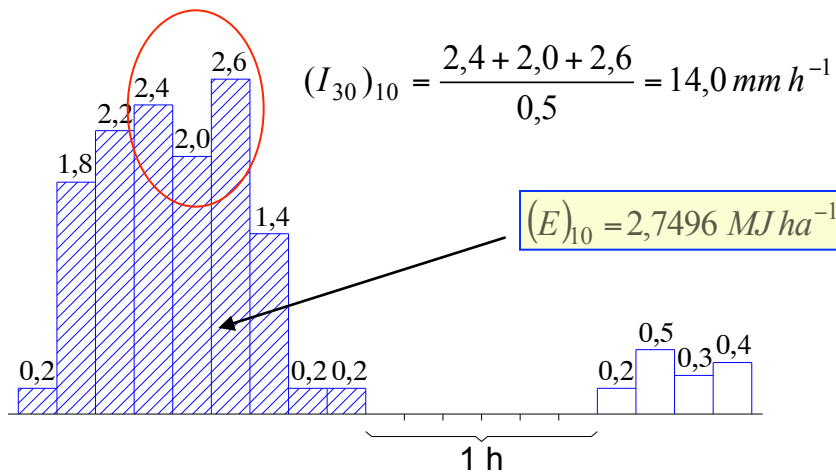
$(E)_{10}$ = Energía cinética total ($MJ ha^{-1}$) según Wischmeier y Smith en intervalos de 10 min

el índice $(EI_{60})_{10}$

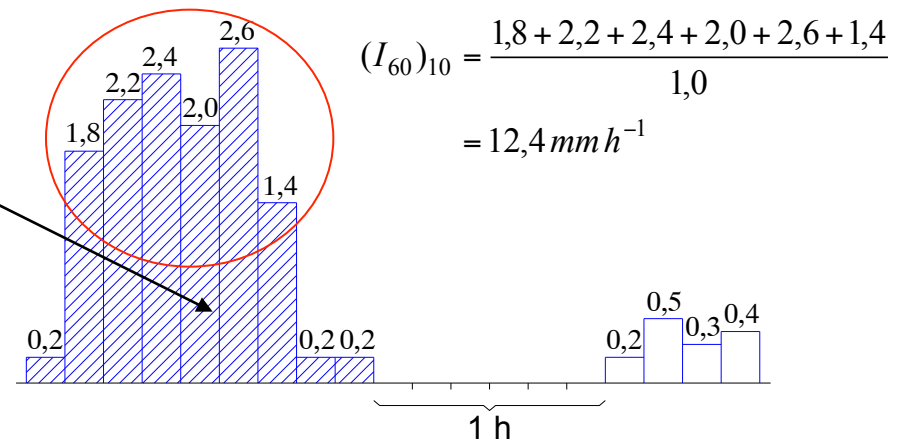
$$(EI_{60})_{10} = (E)_{10} (I_{60})_{10}$$

$(I_{30})_{10}$ = Máxima intensidad de lluvia ($mm h^{-1}$) en 30 min

$(I_{60})_{10}$ = Máxima intensidad de lluvia ($mm h^{-1}$) en 60 min



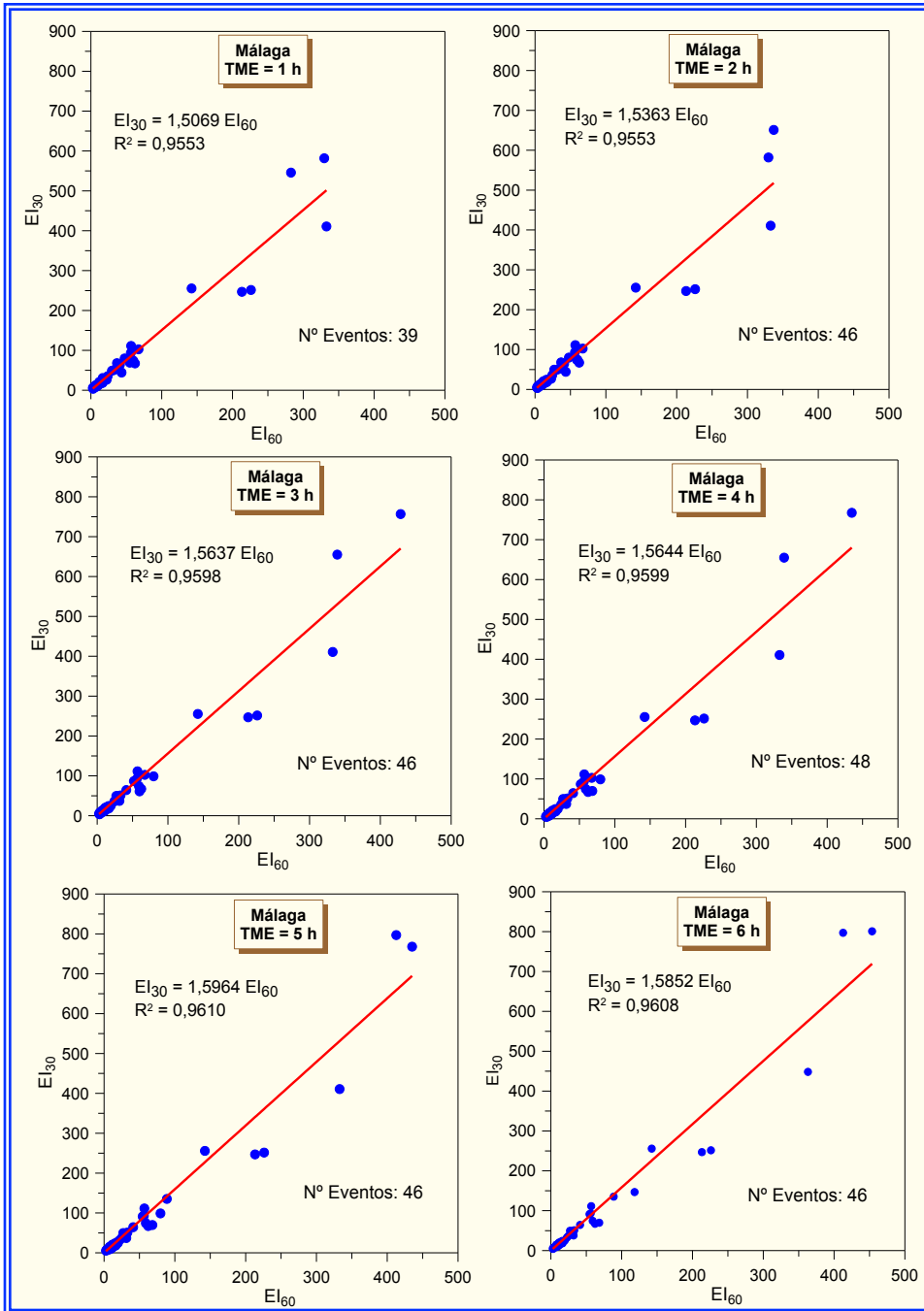
$$(EI_{30})_{10} = (E)_{10} (I_{30})_{10} = 2,7496 \times 14,0 = 38,494 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$$



$$(EI_{60})_{10} = (E)_{10} (I_{60})_{10} = 2,7496 \times 12,4 = 34,094 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$$

$$(EI_{30})_{10} > (EI_{60})_{10}$$

Periodo 1999-2002 Resolución 10 minutos



Mediante regresiones lineales se han correlacionado los valores de los índices $(EI_{30})_{10}$ y $(EI_{60})_{10}$ con los aguaceros identificados con los diversos TME.

Series de datos 10 min			
Estación	TME	Relación EI_{30}/EI_{60}	R^2
Jáen	1	1,5477	0,9606
	2	1,5179	0,9592
	3	1,4943	0,9585
	4	1,4953	0,9597
	5	1,4954	0,9601
	6	1,5758	0,9621
Granada	1	1,1932	0,9810
	2	1,1833	0,9849
	3	1,1889	0,9829
	4	1,1895	0,9827
	5	1,1903	0,9825
	6	1,1935	0,9821
Málaga	1	1,5069	0,9553
	2	1,5363	0,9553
	3	1,5637	0,9598
	4	1,5644	0,9599
	5	1,5965	0,9610
	6	1,5852	0,9608
Series de datos 30 min			
Almería	1	1,3344	0,9642
	2	1,3344	0,9643
	3	1,3665	0,9656
	4	1,3677	0,9655
	5	1,3483	0,9645
	6	1,3641	0,9656

Estimación de la erosividad a escala de precipitación diaria. Relaciones Precipitación diaria-Índice EI_{30}

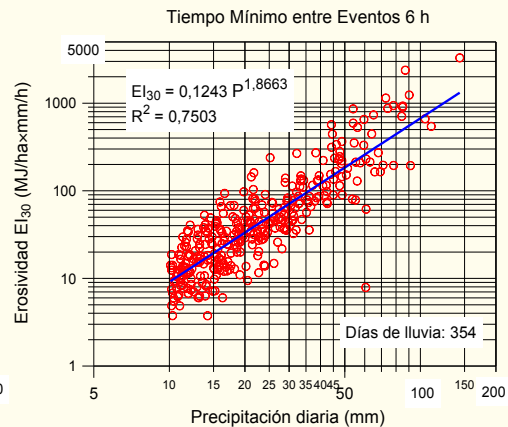
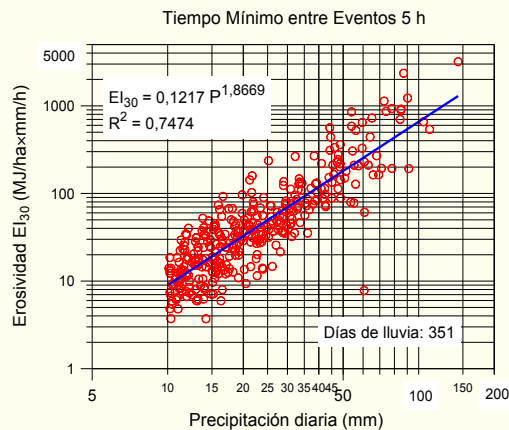
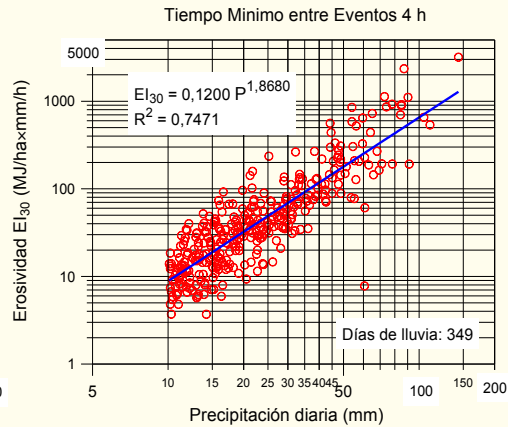
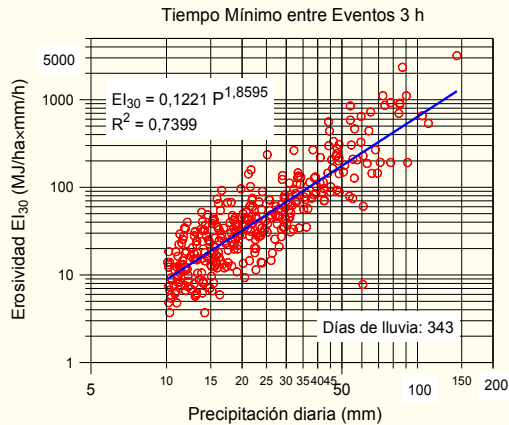
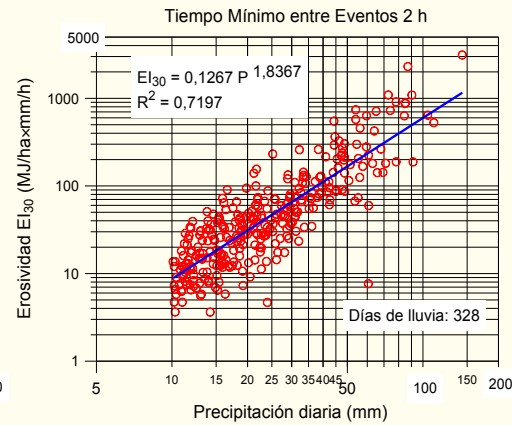
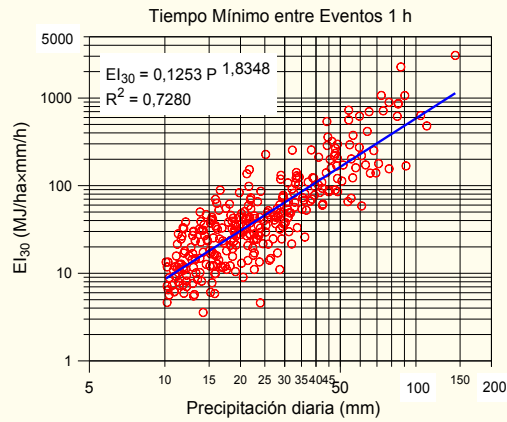
Se ha correlacionado el índice EI_{30} diario con la precipitación diaria, P , mediante una relación de tipo potencial

$$EI_{30} = \alpha P^\beta$$

Con las series de precipitaciones horarias se ha seguido la siguiente metodología

- ① Se selecciona la precipitación diaria si $P \geq 10$ mm
- ② Se identifican los aguaceros separándolos por un TME de 1, 2, 3, 4, 5, y 6 h, considerando aquellos aguaceros que igualan o superan el umbral de 10 mm
- ③ Para cada aguacero se estima la erosividad mediante el índice EI_{60}
- ④ Se calcula el índice EI_{60} de la precipitación diaria como suma de los índices EI_{60} de los aguaceros identificados en la precipitación diaria.
- ⑤ Mediante las correlaciones $EI_{30} = f(EI_{60})$, se transforman los valores de erosividad diaria EI_{60} en la correspondiente EI_{30} diaria.
- ⑥ Se correlacionan los valores del índice EI_{30} diario con la precipitación diaria P , para obtener α y β del modelo de correlación aplicado

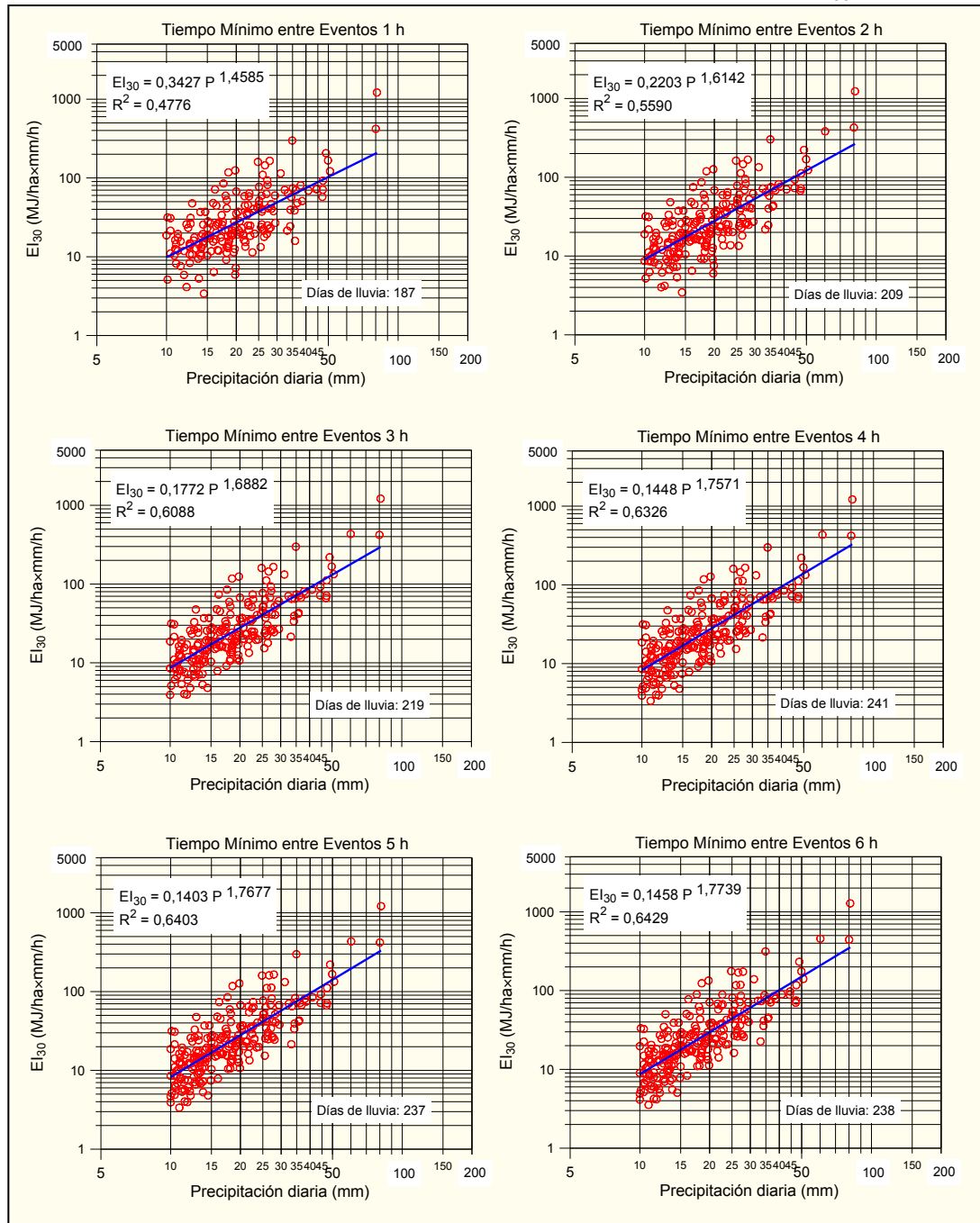
Málaga (Aeropuerto). Relación Precipitación diaria- EI_{30}



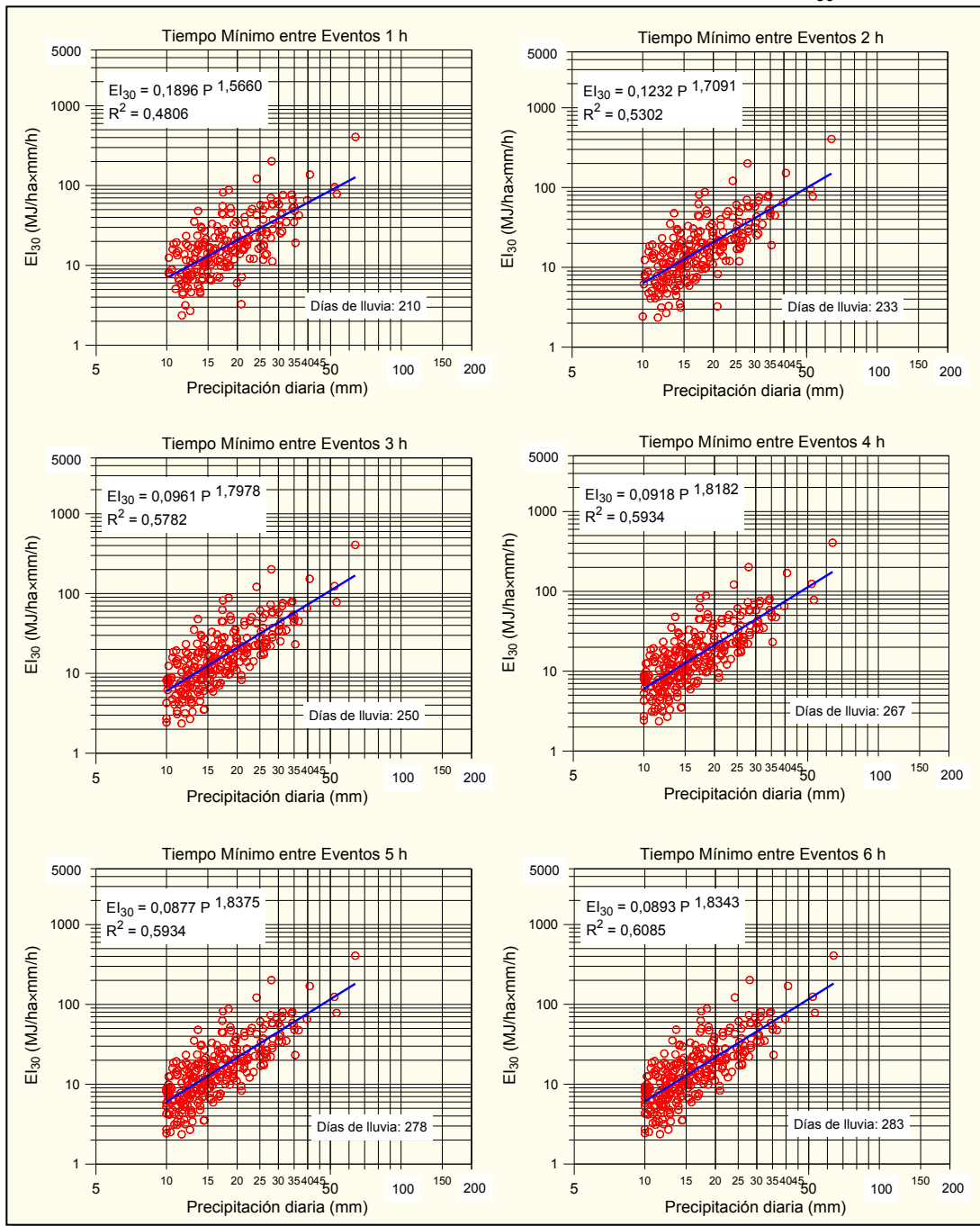
Valores de los parámetros α , β y R^2 de las relaciones $EI_{30} = \alpha P^\beta$, de la erosividad de la lluvia con la precipitación diaria P

Jaén (Cerro Los Lirios)			
TME (h)	α	β	R^2
1	0,3427	1,4585	0,4776
2	0,2203	1,6142	0,5590
3	0,1772	1,6882	0,6088
4	0,1448	1,7571	0,6326
5	0,1403	1,7677	0,6403
6	0,1458	1,7739	0,6429
Málaga (Aeropuerto)			
1	0,1253	1,8348	0,7280
2	0,1267	1,8367	0,7197
3	0,1221	1,8595	0,7399
4	0,1200	1,8680	0,7471
5	0,1217	1,8669	0,7474
6	0,1243	1,8663	0,7503
Granada (Aeropuerto)			
1	0,1896	1,5660	0,4806
2	0,1232	1,7091	0,5302
3	0,0961	1,7978	0,5782
4	0,0918	1,8182	0,5934
5	0,0877	1,8375	0,5934
6	0,0893	1,8343	0,6085
Almería (Aeropuerto)			
1	0,0718	2,0418	0,6504
2	0,0637	2,0817	0,6822
3	0,0686	2,0701	0,6921
4	0,0654	2,0868	0,7146
5	0,0626	2,0964	0,7139
6	0,0608	2,1101	0,7045

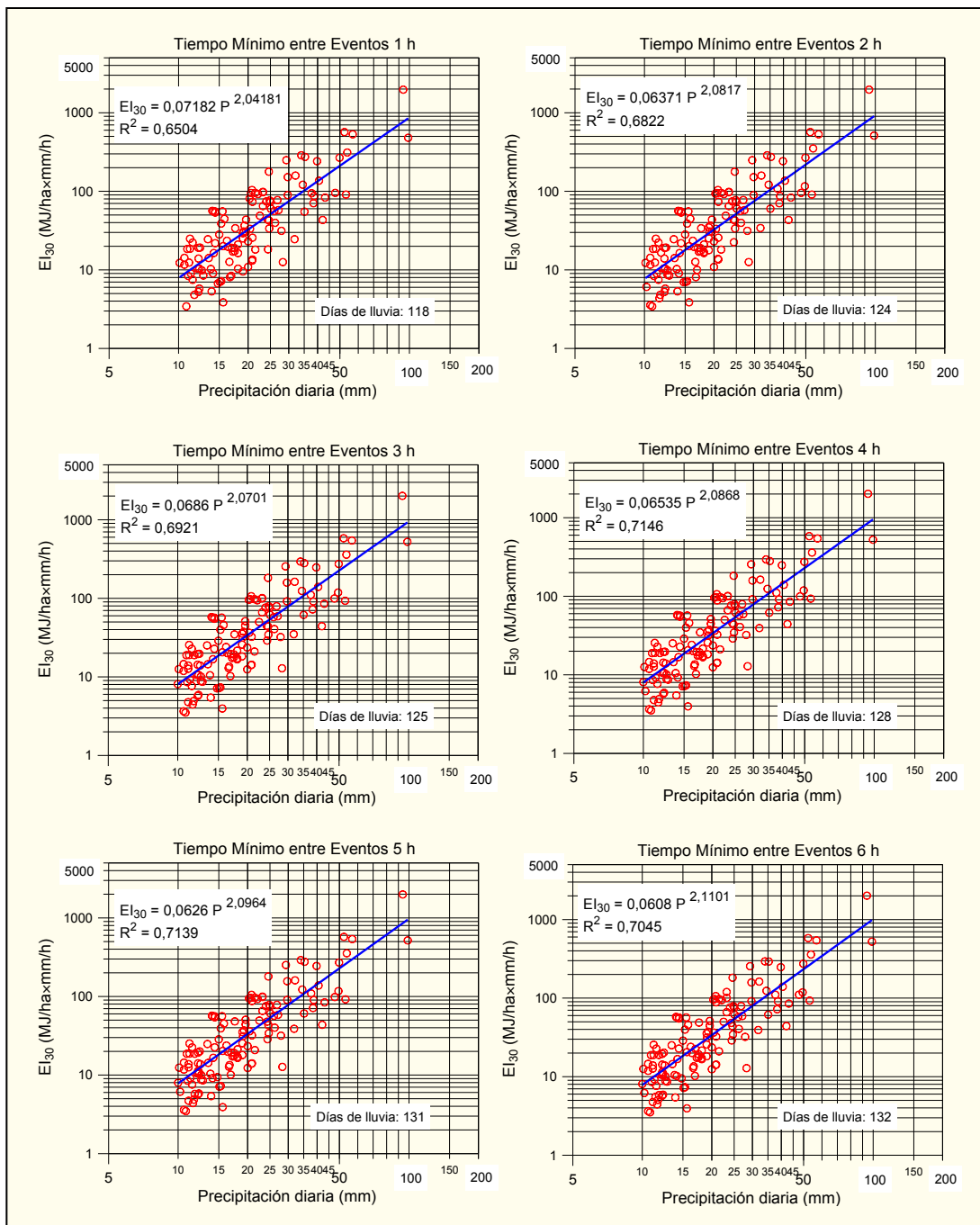
Jaén (Cerro Los Lirios). Relación Precipitación diaria- EI_{30}



Granada (Aeropuerto). Relación Precipitación diaria-El₃₀



Almería (Aeropuerto). Relación Precipitación diaria- EI_{30}



Estimación de la erosividad a escala anual. Relaciones Precipitación anual-Índice EI_{30}

Se estima el índice de erosividad anual como suma de los índices de erosividad EI_{30} de los aguaceros individuales identificados en cada año con los datos horarios

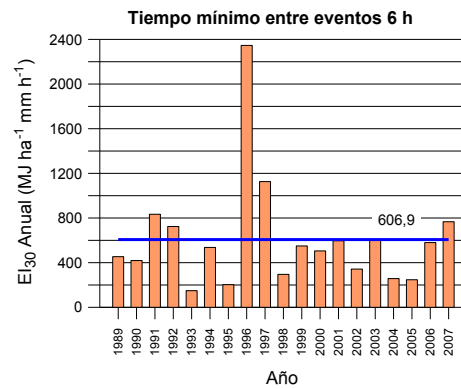
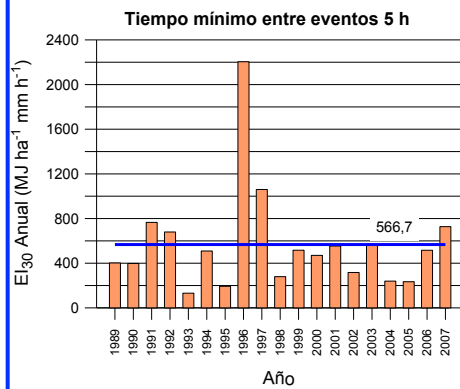
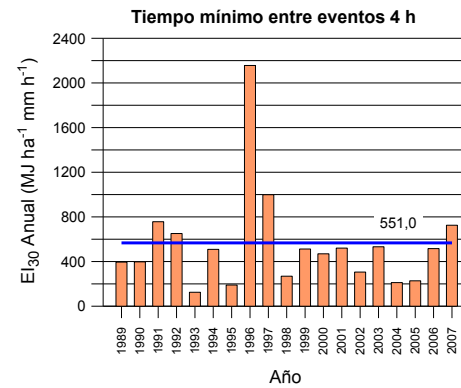
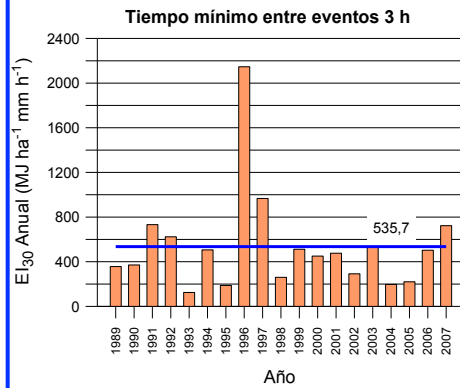
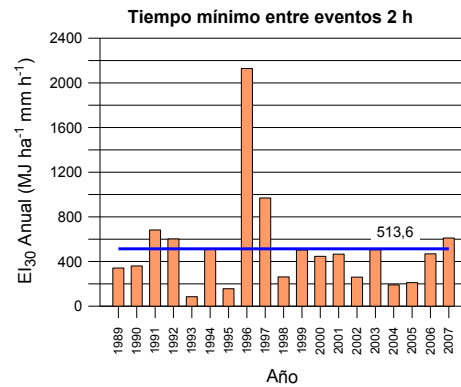
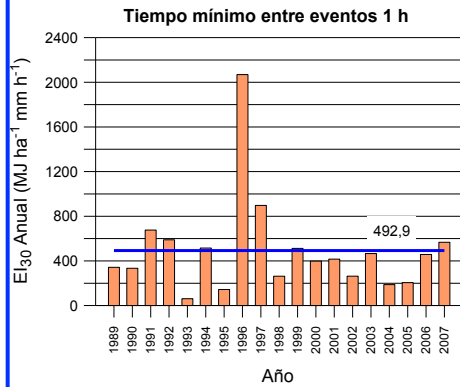
Se correlaciona el índice EI_{30} anual con la precipitación anual, P_a , mediante una relación de tipo potencial

$$EI_{30} = \alpha P_a^B$$

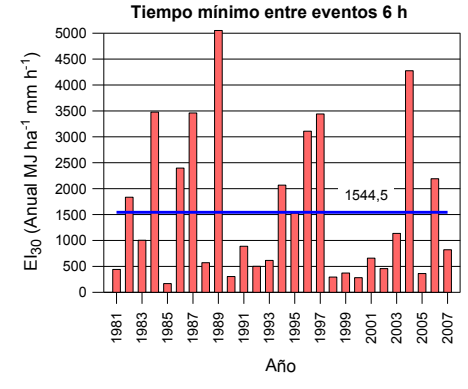
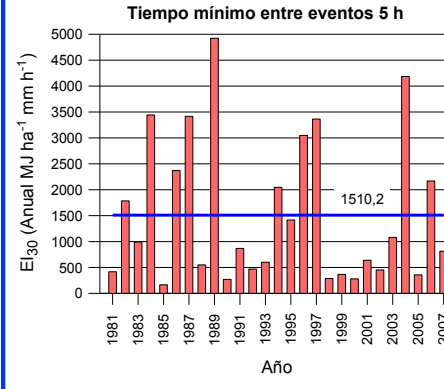
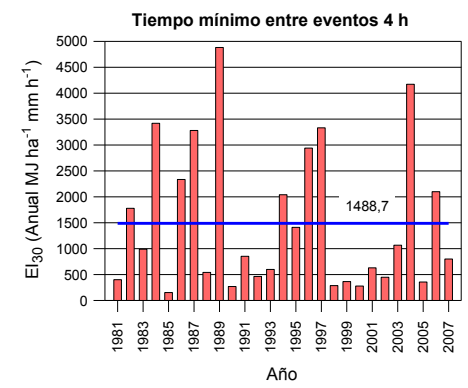
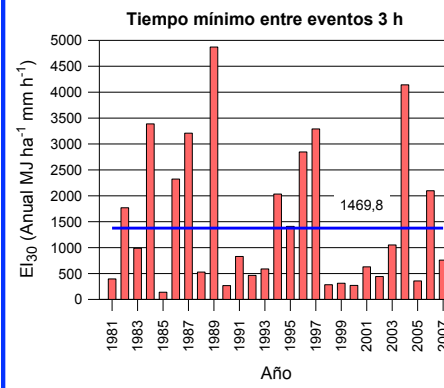
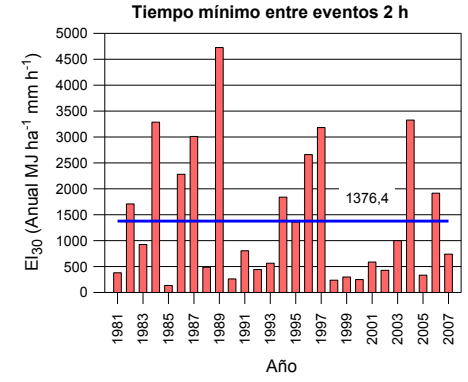
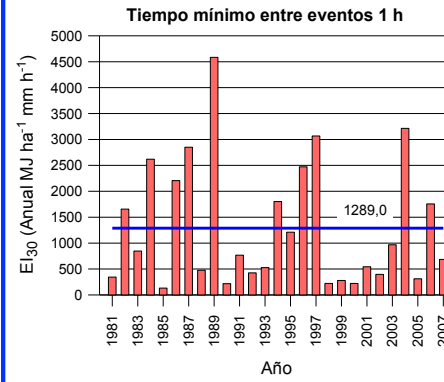
Metodología

- ① Se analiza cada año identificando los aguaceros considerando un TME de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 h, seleccionando los ≥ 10 mm
- ② Para cada aguacero seleccionado se estima el índice EI_{60}
- ③ Se estima el índice EI_{60} de la precipitación anual como suma de los índices EI_{60} de los aguaceros identificados en cada año.
- ④ Mediante las correlaciones $EI_{30} = f(EI_{60})$, se transforman los valores de erosividad anual EI_{60} en la correspondiente EI_{30} anual.
- ⑤ Se correlacionan los valores del índice EI_{30} anual con la precipitación anual P_a , para obtener α y β del modelo de correlación aplicado

Jaén (Cerro Los Lirios)

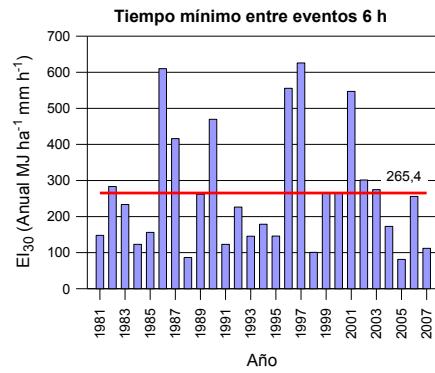
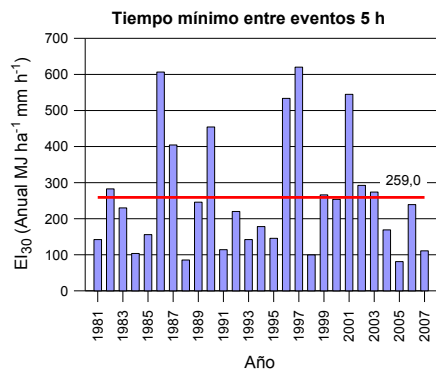
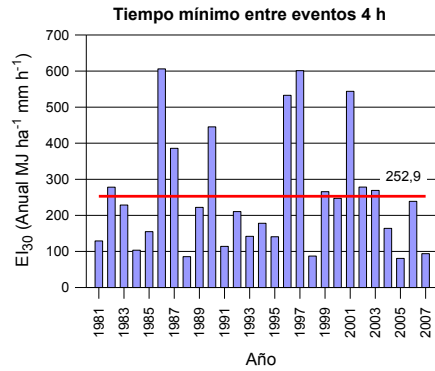
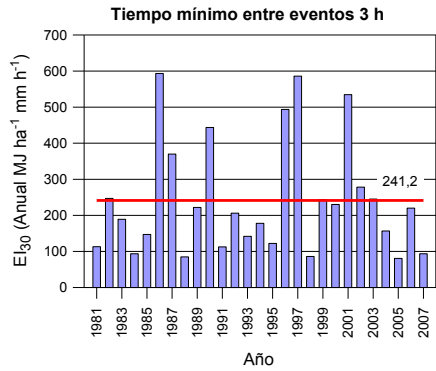
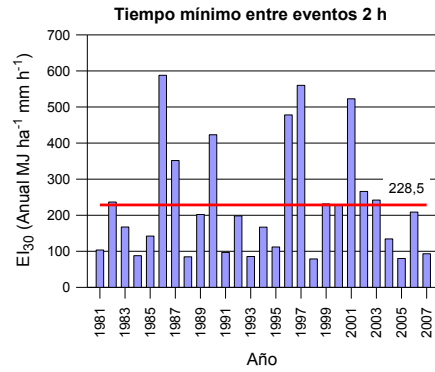
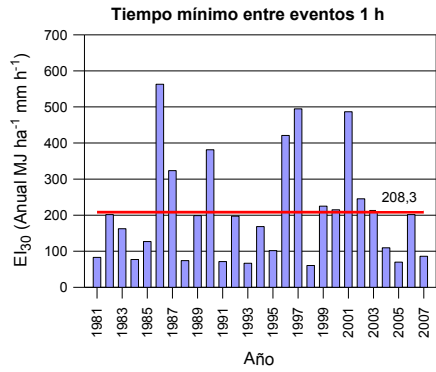


Málaga (Aeropuerto)

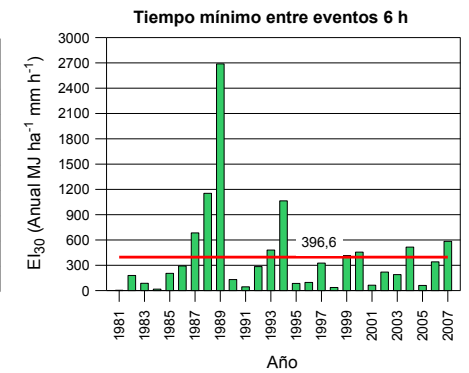
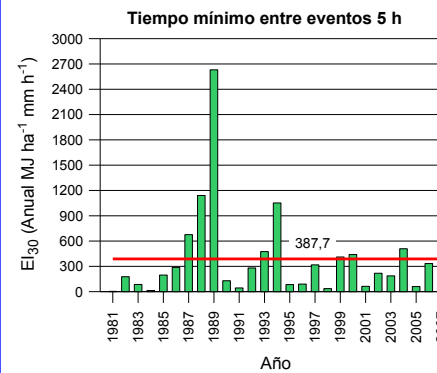
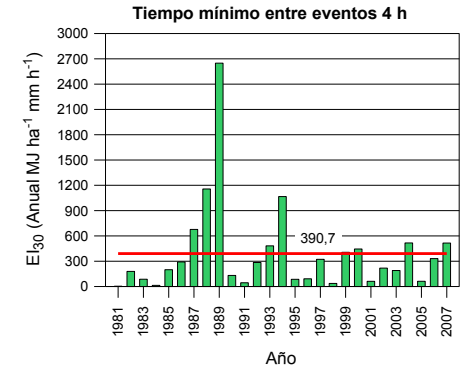
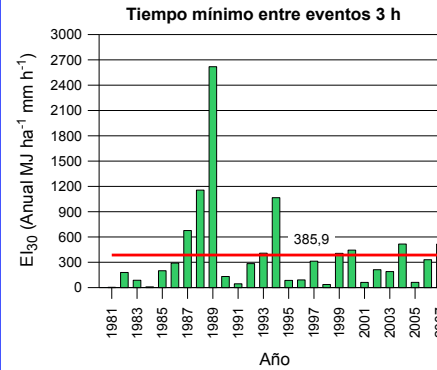
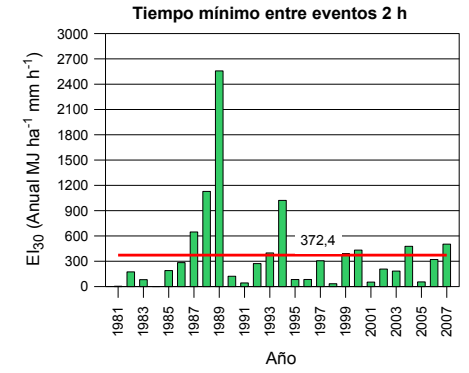
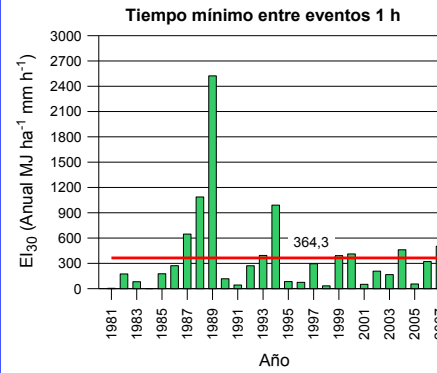


Valores de la erosividad anual y erosividad media anual en la estación de Jaén y Málaga

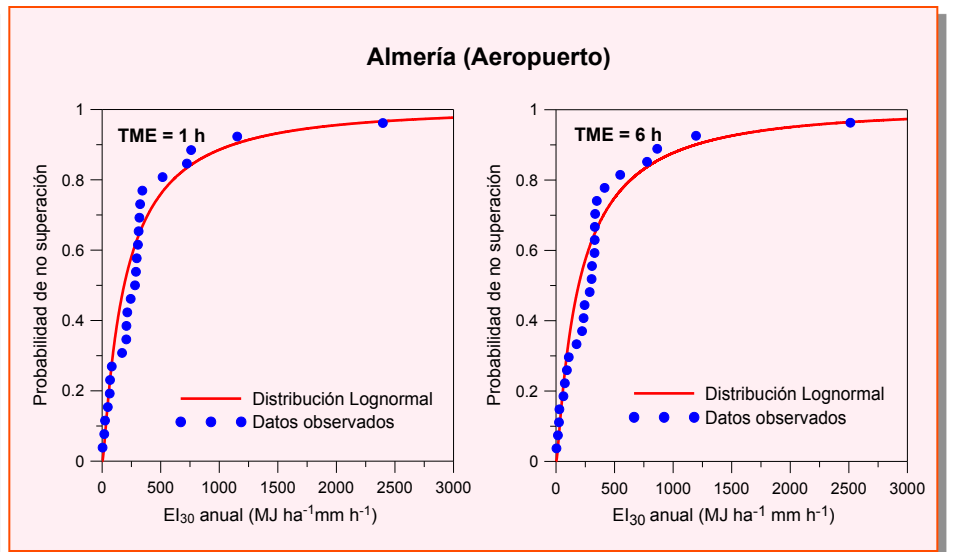
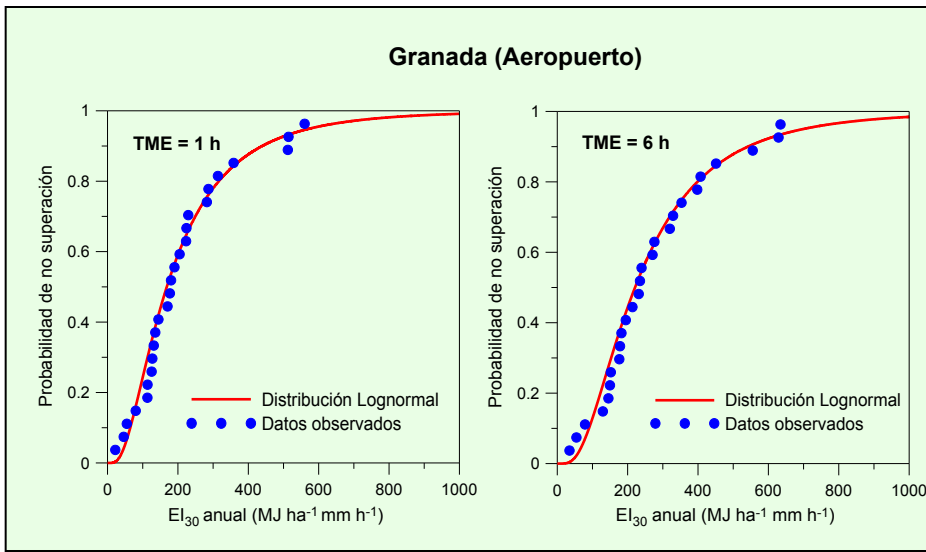
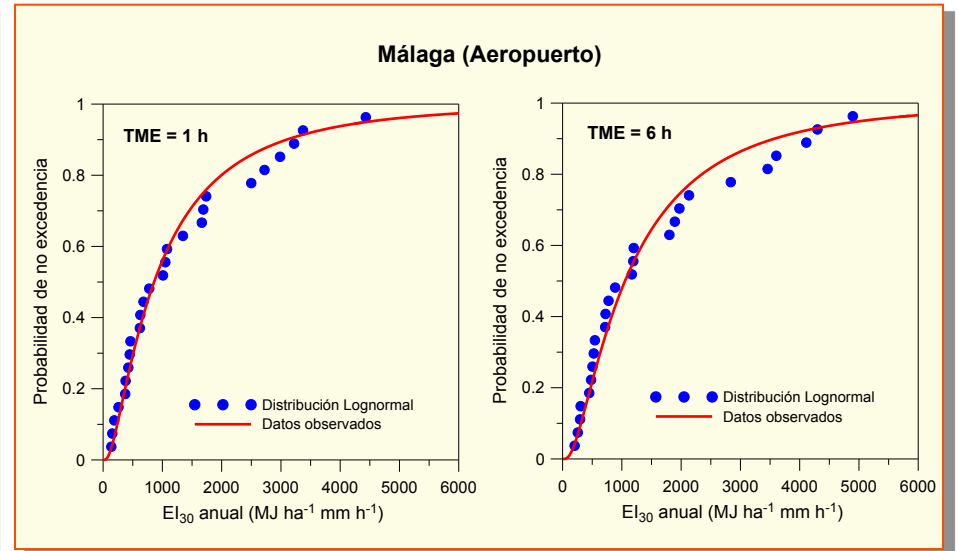
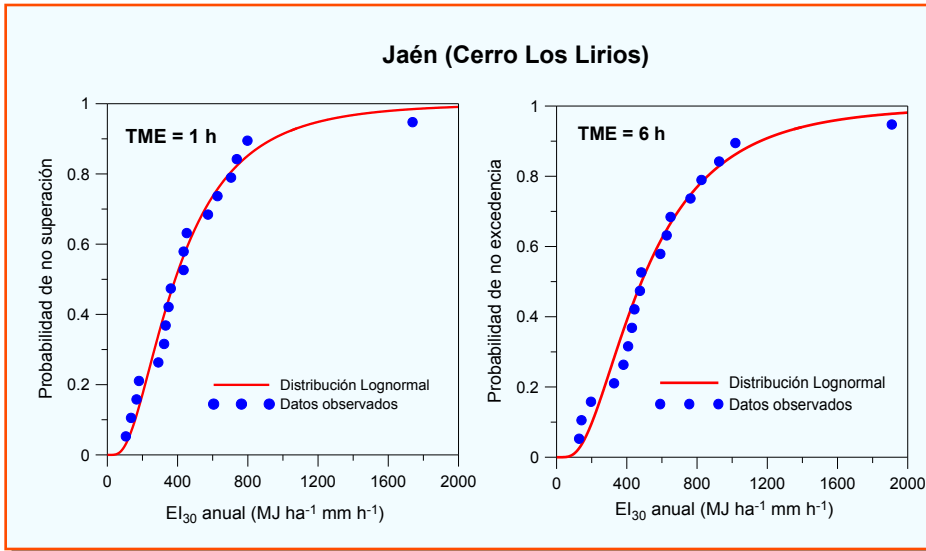
Granada (Aeropuerto)



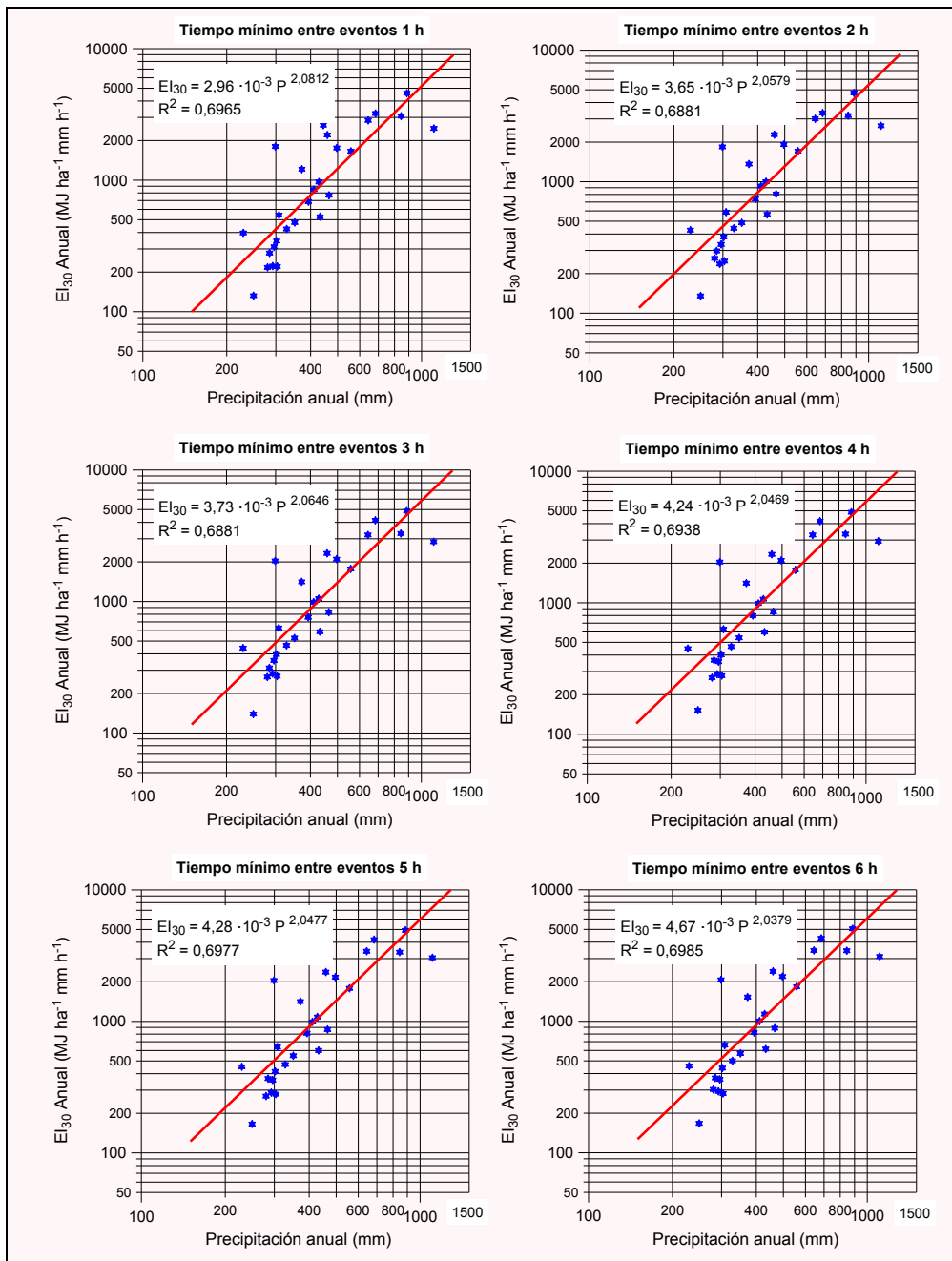
Almería (Aeropuerto)



Ajuste de los valores EI_{30} anuales a la función de distribución Lognormal



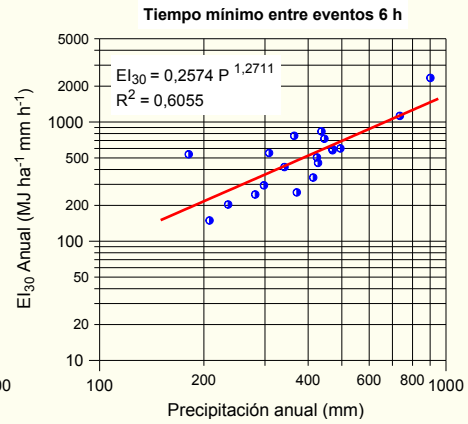
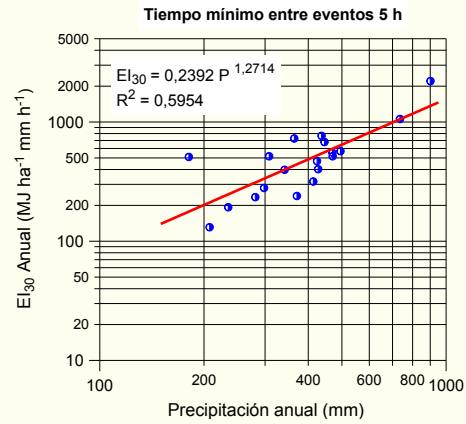
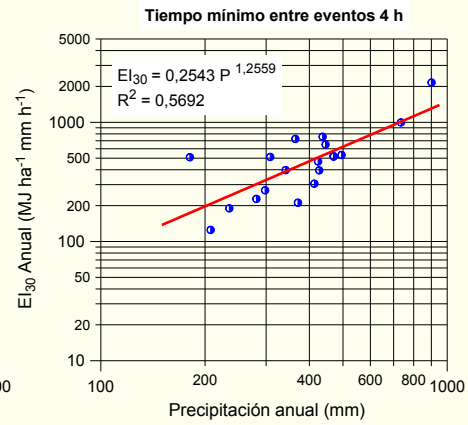
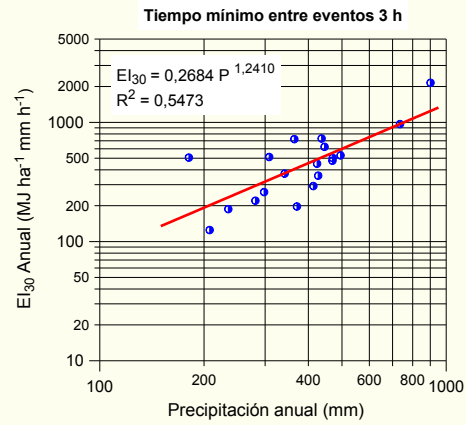
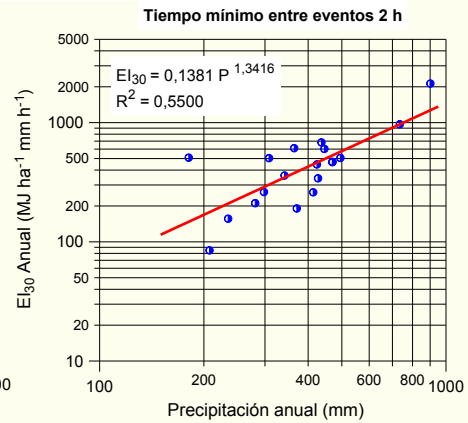
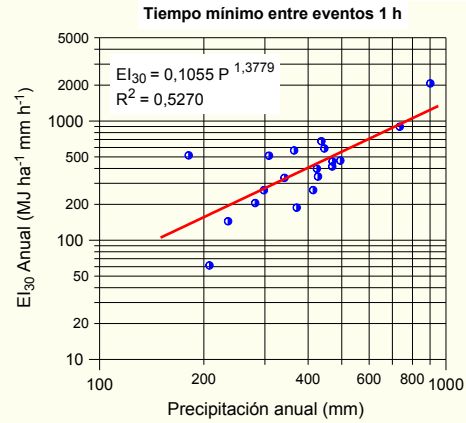
Precipitación anual versus Índice EI₃₀. Málaga (Aeropuerto)



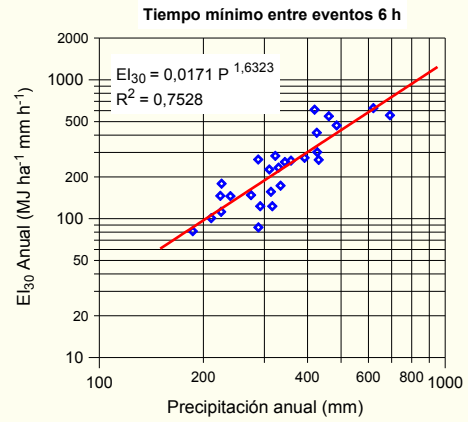
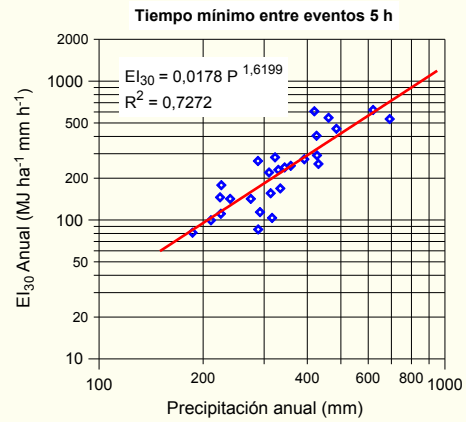
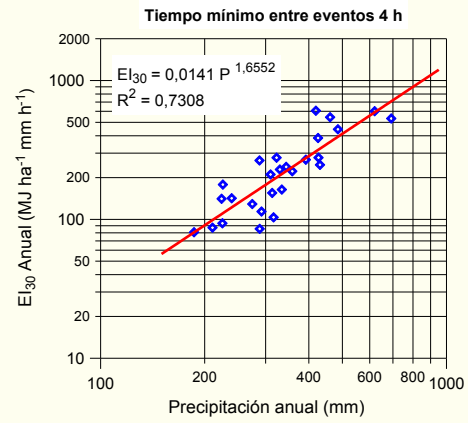
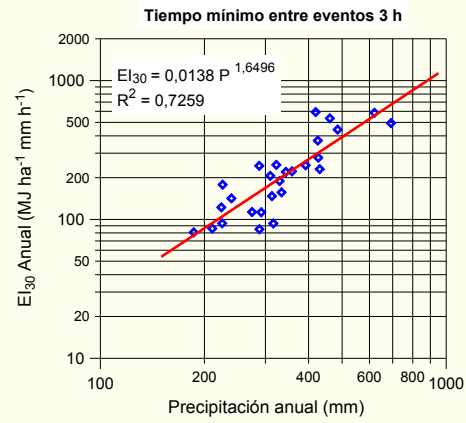
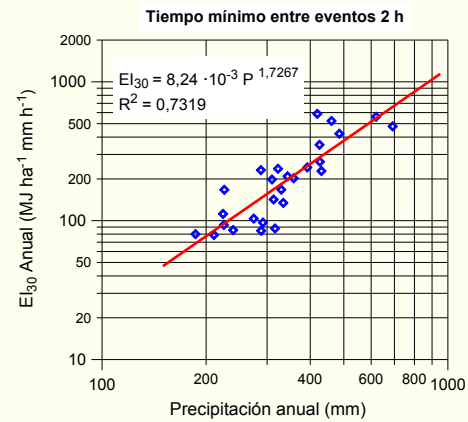
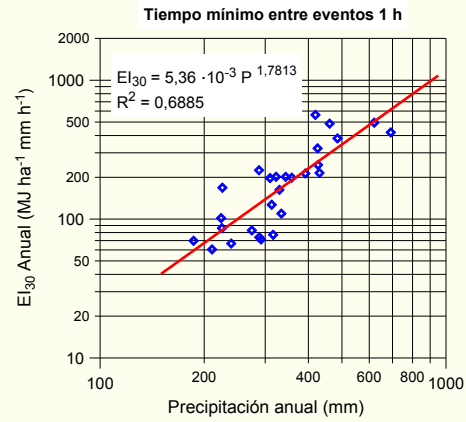
Valores de los parámetros α , β y R^2 de las relaciones $EI_{30} = \alpha P_a^\beta$, de la erosividad anual de la lluvia con la precipitación anual P_a

TME (h)	α	β	R^2
Jaén (Cerro de Los Lirios)			
1	0,1055	1,3779	0,5270
2	0,1381	1,3416	0,5500
3	0,2684	1,2410	0,5473
4	0,2543	1,2559	0,5692
5	0,2392	1,2714	0,5954
6	0,2574	1,2711	0,6055
Málaga (Aeropuerto)			
1	0,002962	2,0812	0,6965
2	0,003653	2,0579	0,6881
3	0,003731	2,0646	0,6881
4	0,004238	2,0469	0,6938
5	0,004280	2,0477	0,6977
6	0,004666	2,0379	0,6985
Granada (Aeropuerto)			
1	0,00536	1,7813	0,6885
2	0,00824	1,7267	0,7319
3	0,01384	1,6496	0,7259
4	0,01409	1,6552	0,7308
5	0,01784	1,6199	0,7272
6	0,01707	1,6323	0,7528
Almería (Aeropuerto)			
1	0,000810	2,3990	0,6644
2	0,000770	2,4134	0,6704
3	0,000341	2,5655	0,6493
4	0,000413	2,5338	0,6674
5	0,000404	2,5368	0,6676
6	0,000427	2,5314	0,6751

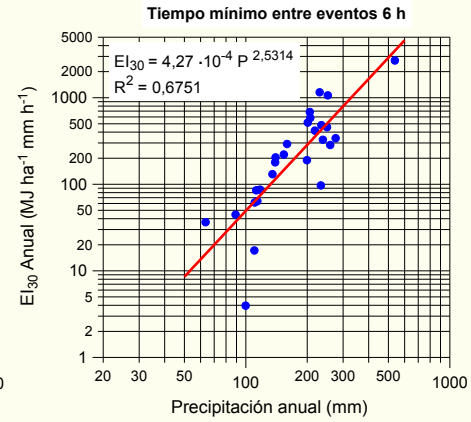
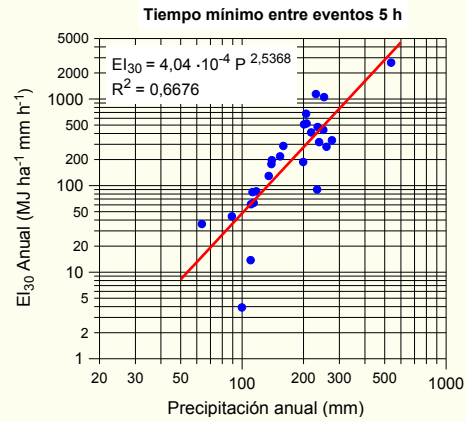
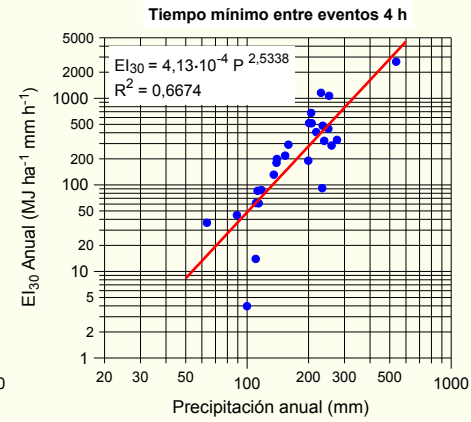
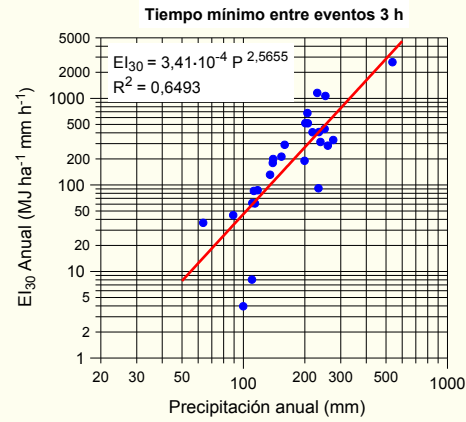
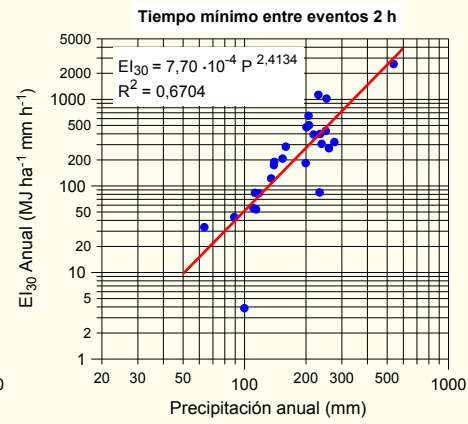
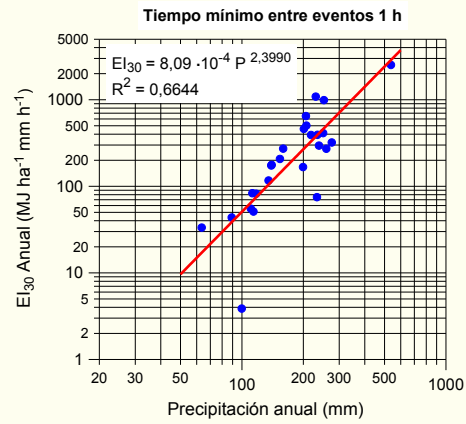
Jaén (Cerro Los Lirios)



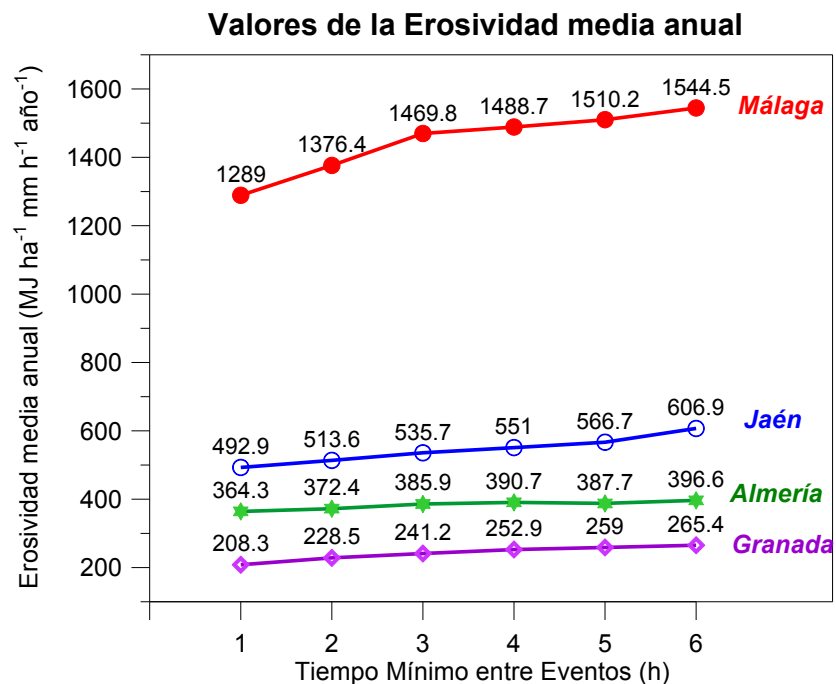
Granada (Aeropuerto)



Almería (Aeropuerto)



Variación de la erosividad media anual con el Tiempo Mínimo entre Eventos



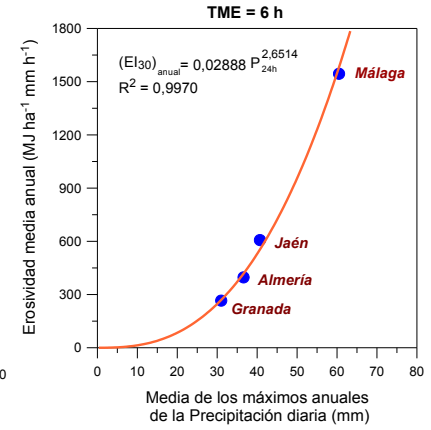
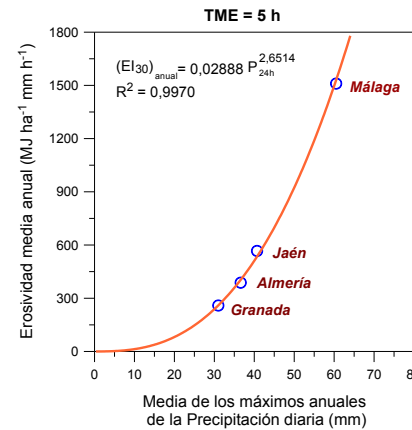
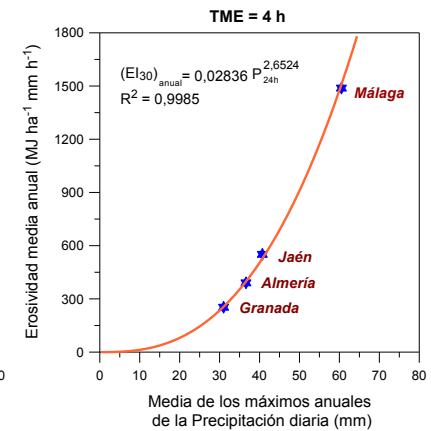
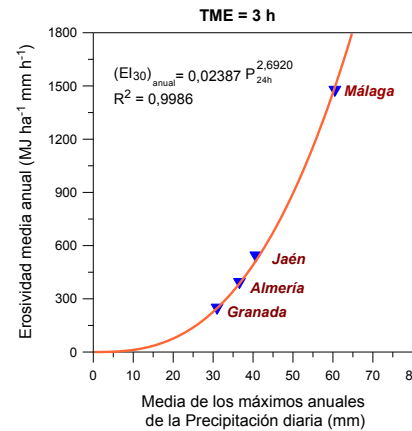
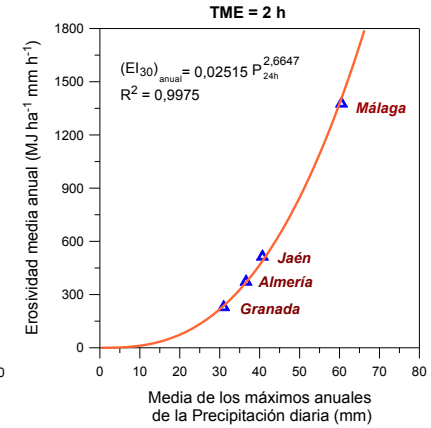
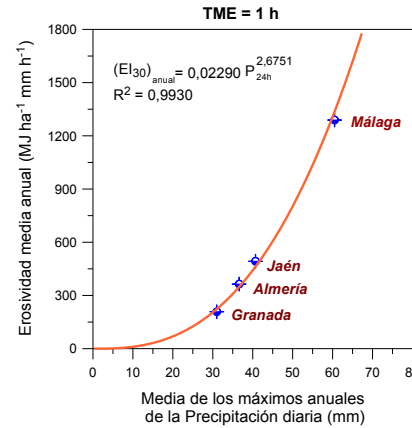
Valores incrementales de la erosividad media anual con el TME

TME (h)	Jaén		Málaga		Granada		Almería	
	Erosividad media anual (*)	% Incremental	Erosividad media anual (*)	% Incremental	Erosividad media anual (*)	% Incremental	Erosividad media anual (*)	% Incremental
1	492,9	-	1289,0	-	208,3	-	364,3	-
2	513,6	4,2	1376,4	6,8	228,5	9,7	372,4	2,2
3	535,7	8,7	1469,8	14,0	241,2	15,8	385,9	5,9
4	551,0	10,5	1488,7	15,5	252,9	21,4	390,7	7,2
5	566,7	15,0	1510,2	17,2	259,0	24,3	387,7	6,4
6	606,9	23,1	1544,5	19,8	265,4	27,4	396,6	8,9

(*) $\left[\frac{MJ \text{ mm}}{ha \text{ h}} \right]$

Relación entre la Erosividad media Anual y el promedio de los máximos anuales de las precipitaciones diarias

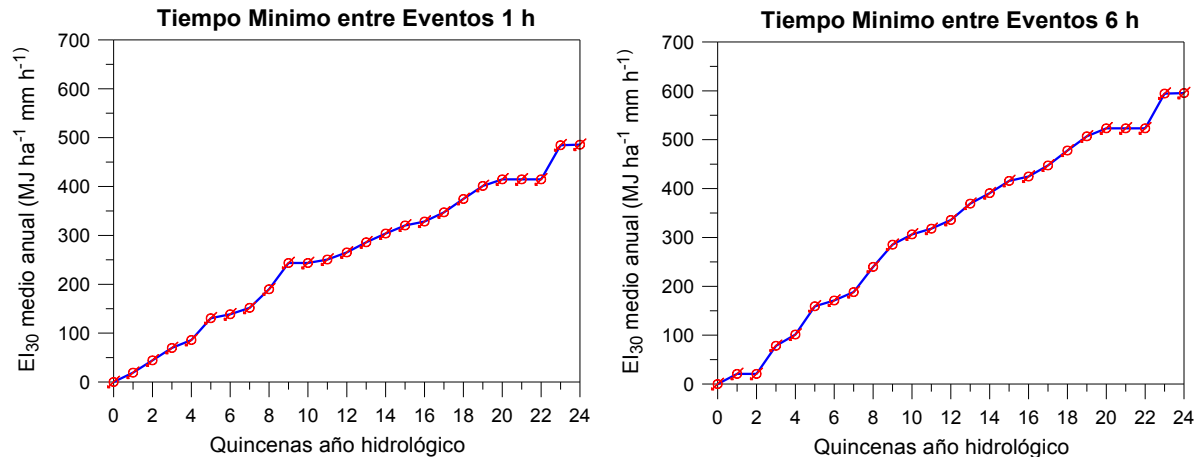
$$(EI_{30})_{anual} = \alpha \bar{P}_d^\beta$$



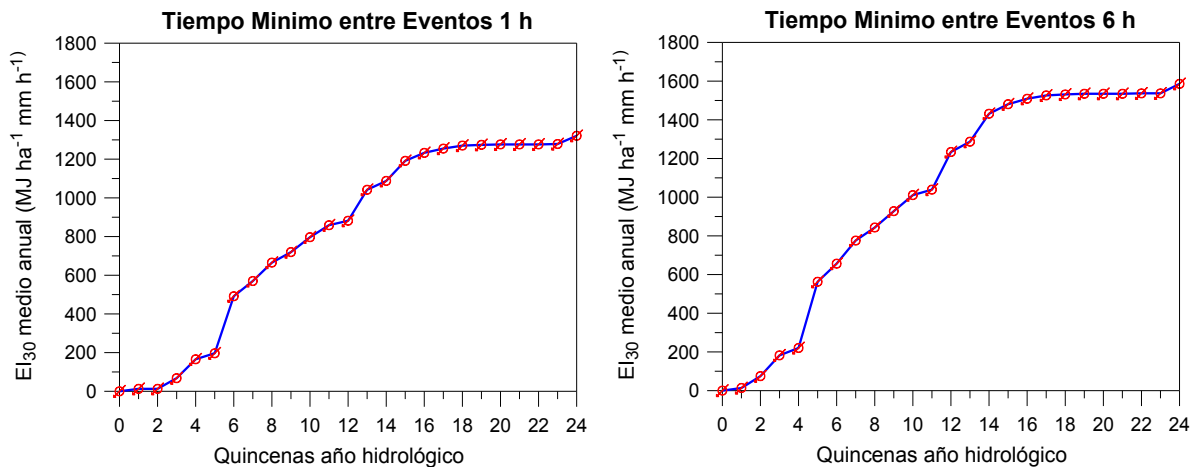
Distribución temporal de la erosividad anual

Se han calculado las erosividades acumuladas por periodos quincenales en cada uno de los años de las series de registros disponibles en cada una de las cuatro estaciones,

Jaén (Cerro Los Lirios)

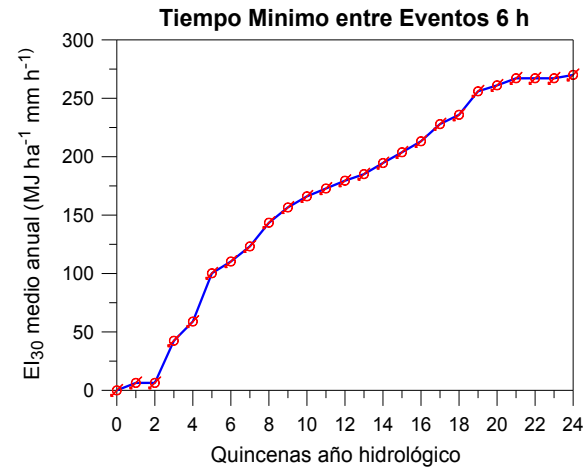
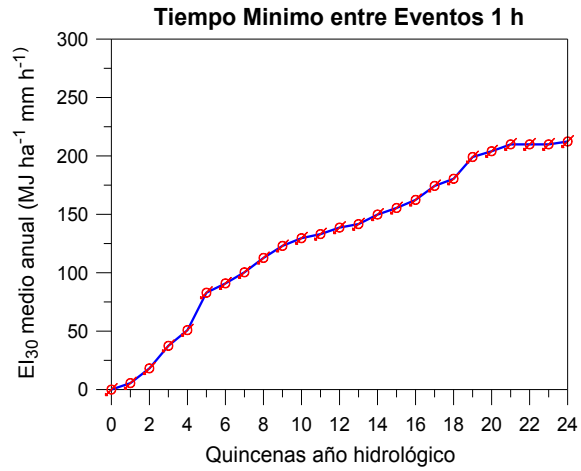


Málaga (Aeropuerto)

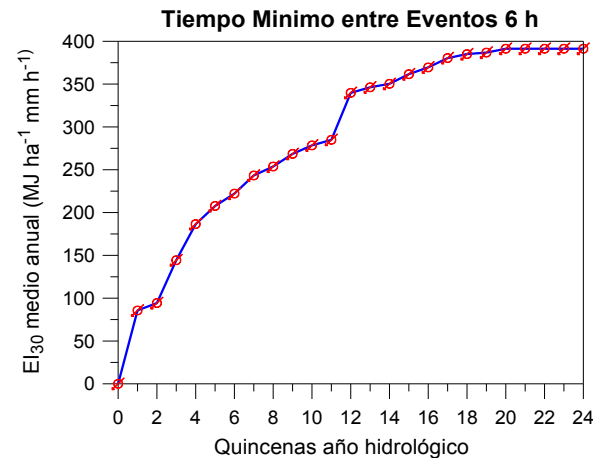
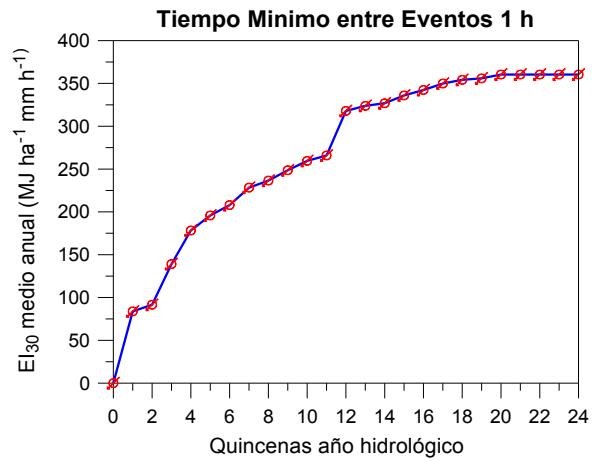


Distribución quincenal de los valores medios de erosividad acumulada expresada mediante el índice EI_{30}

Granada (Aeropuerto)



Almería (Aeropuerto)

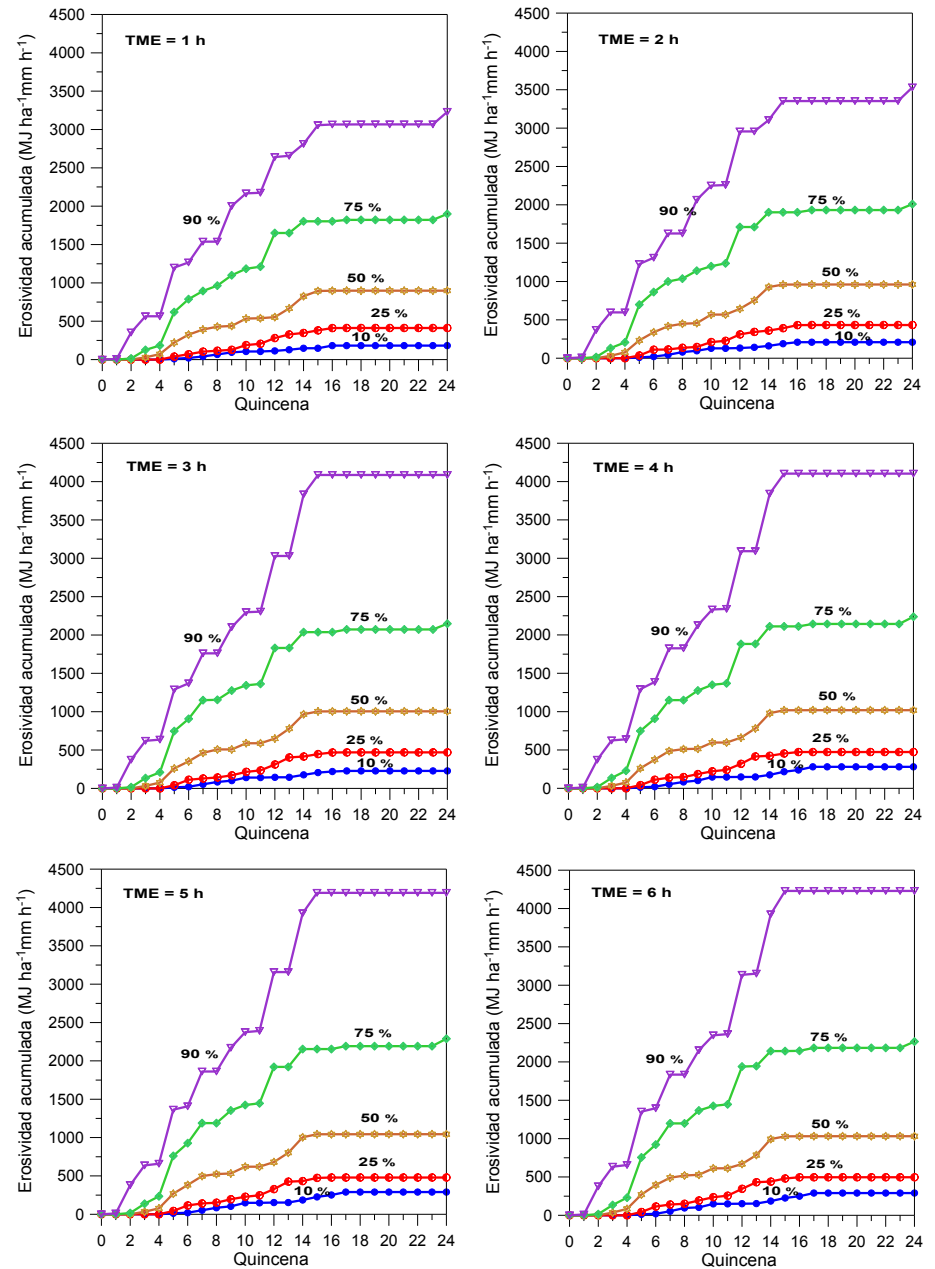


Distribución quincenal de los valores medios de erosividad acumulada expresada mediante el índice EI₃₀

Distribución quincenal de la erosividad acumulada para diversas probabilidades

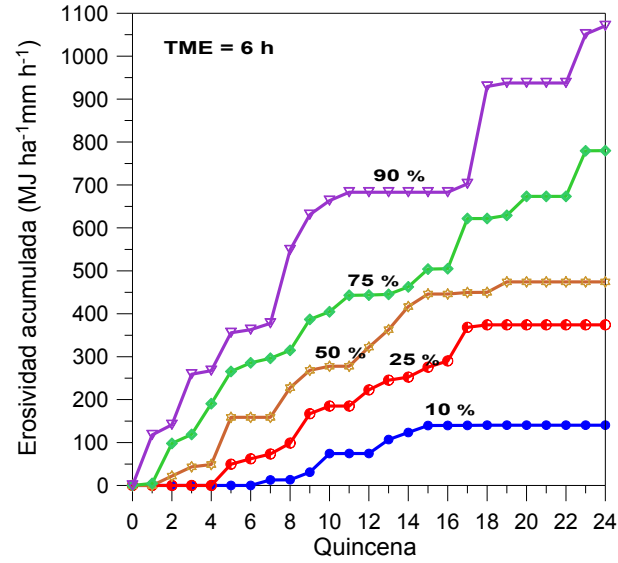
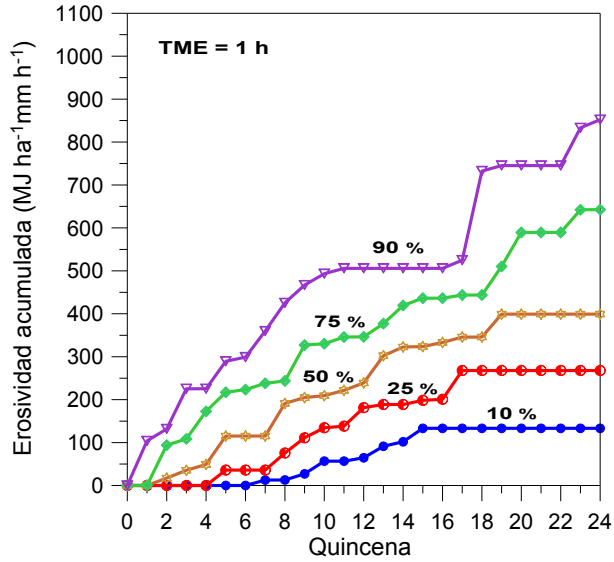
Con los valores quincenales de la erosividad acumulada, de los diversos años de registro disponibles y mediante interpolación con esplines cúbicos, se ha calculado la erosividad acumulada, para cada quincena, con probabilidades de no excedencia del 10 %, 25 %, 50 %, 75 % y 90 %.

Málaga (Aeropuerto)

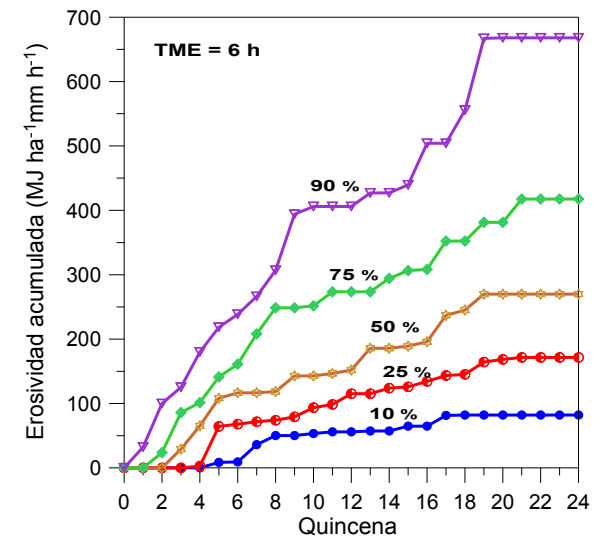
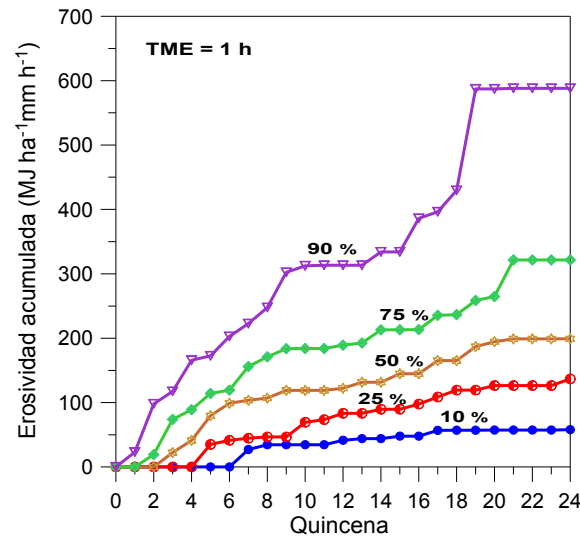


Distribución quincenal de la erosividad acumulada para diversas probabilidades

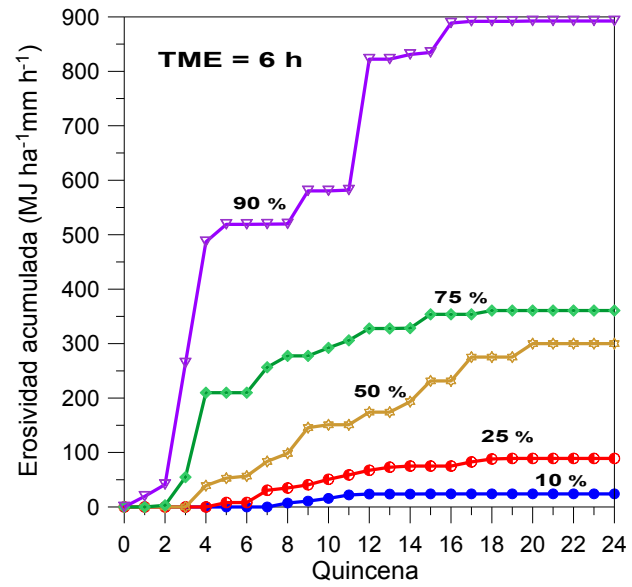
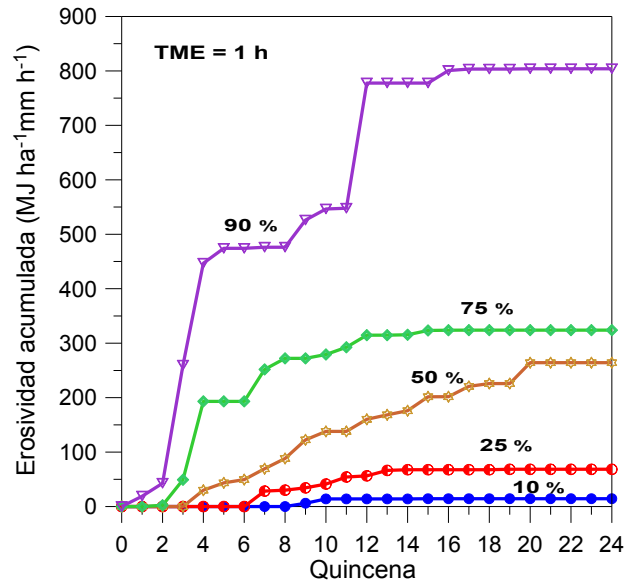
Jaén (Cerro Los Lirios)



Granada (Aeropuerto)



Almería (Aeropuerto)



CONCLUSIONES

Como conclusiones más relevantes pueden establecerse las siguientes:

- 1.** Con el criterio de Dunkerley, de separación de aguaceros, se ha procedido a calcular la erosividad de la lluvia a escala de aguacero, de lluvia diaria y de lluvia anual, utilizando periodos secos o TME de 1, 2, 3, ..., 6 h.
En general la erosividad se incrementa con el aumento del TME utilizado, recomendándose emplear el tiempo de 6 horas para la identificación de los aguaceros.
- 2.** Las mayores tasas de erosividad media anual se obtienen en la estación de Málaga, seguidas de Jaén y Almería, correspondiendo a Granada la más baja, presentando Málaga un valor del orden de 2,5 veces la erosividad media anual de Jaén, superior a 3,5 veces la erosividad de Almería y en torno a 6 veces la de Granada.
- 3.** Se ha obtenido para la región relaciones de tipo potencial entre el promedio de los máximos anuales de la precipitación diaria y la erosividad media anual,
- 4.** Finalmente, la distribución estacional de la erosividad acumulada con diversos niveles de probabilidad (10, 25, 50 75 y 90 %) permite obtener en cada quincena del año la magnitud de la erosividad con dichas probabilidades.

