

## PRECIPITACIONES EN LA CUENCA DEL EBRO (1947-2006) Y VALORACIÓN DE SU EVOLUCIÓN

**Antonio Gamo Baeza**

*Director de Programa de Análisis y Vigilancia del INM*

**Alberto Jiménez de Mingo.**

*Especialista de Climatología del INM*

### **Resumen**

*Dentro de un proyecto más amplio, relativo a toda España, y como continuación de un último trabajo en el Calendario Meteorológico[1], se presentan análisis y resultados correspondientes a las precipitaciones calculadas sobre la cuenca del Ebro. El estudio se desarrolla hasta periodos de menor extensión temporal que en el mencionado anteriormente, el dato mensual.*

*Después de unas consideraciones sobre las series de datos, se incorporan:*

*-Un Análisis de homogeneidad.*

*-La interpretación teórica a través de la Función de Distribución Gamma.*

*-Varias aplicaciones de Gamma en forma gráfica y tabulada para el Ebro.*

*-Alguna medida del ajuste de los percentiles teóricos con los reales empíricos. Desviaciones y errores.*

*-La evolución de los parámetros de la F.d.D. Gamma con el tiempo.*

*-Un Índice de Probabilidad de Precipitaciones para distintos periodos de acumulación.*

*-Valoración de las diferencias entre la D. Gamma y la D. Normal en acumulaciones progresivas.*

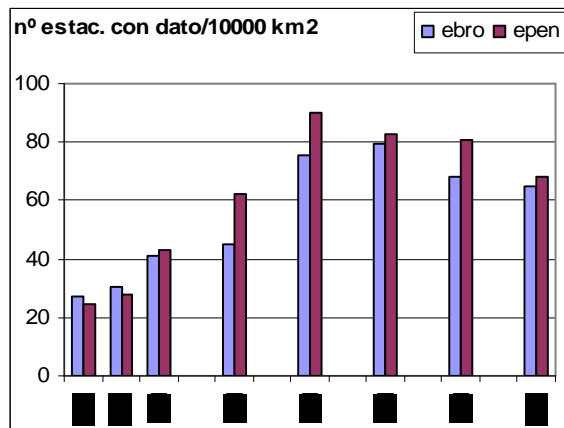
*-Aplicaciones gráficas de Gamma para la localización de periodos secos y húmedos, y*

*-Valoración del cambio producido en las precipitaciones en los últimos sesenta años.*

**1. Datos origen.-** Se ha partido del resultado obtenido del tratamiento de los datos mensuales de toda la Red Pluviométrica a través de los volúmenes calculados de precipitación, que viene haciendo el INM desde el año 1957, con datos desde 1947.

Considerando que los datos originales de las estaciones ya fueron sometidos a controles, mínimos pero crecientes a lo largo del tiempo, y que siguen siendo la base del Atlas Climatológico, se han estudiado las series derivadas de precipitación específica media para cada mes y cuenca, así como las derivadas por acumulaciones estacionales y anuales.

No se debe dejar de considerar la gran variación en el número de estaciones con dato disponible en cada cuenca a lo largo del tiempo, y determinar la aleatoriedad de la extracción con observatorios de comprobada homogeneidad. En la cuenca del Ebro el número de estaciones disponibles varía entre 27 por cada 10000 km<sup>2</sup> en 1947 y 80 en 1981, con valores muy próximos a la media peninsular. (Ver Graf.1)



**Graf.1: Evolución del nº de estaciones**

Aunque ya fueron tratados en un trabajo interno en 1996, con la finalidad de establecer la estadística básica de unas series que podían ser de gran utilidad, ahora se han completado las series disponibles, hasta sesenta años, e incorporado nuevos tratamientos.

Por razones de espacio se ha obviado el tratamiento estadístico básico, de rápida obtención, para centrar el análisis en la evolución y el comportamiento. Solo indicar que las series tratadas suponen una suavización de los estadísticos obtenidos para un determinado observatorio o de cualquiera cuenca menor interna.

El estudio se centra en la cuenca del Ebro, aunque para su comparación se ha incorporado el total peninsular y de las Vertiente Mediterránea y Atlántica en algunas secciones

. Siendo una cuenca muy compleja, de regímenes pluviométricos variados, con influencia atlántica y mediterránea, se ha considerado de interés

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO	inv	pri	ver	oto
EBRO	25	31	32	32	31	29	30	23	28	28	32	31	31	27	27	30	33
V.MEDITERR.	28	33	39	34	27	29	36	25	34	36	25	34	31	26	31	29	33
E.PENINSULAR	29	32	30	34	33	25	32	23	30	25	23	34	26	29	31	25	33
N.-NOROESTE	30	24	26	34	23	30	32	33	32	25	27	29	26	29	23	22	25
DUERO	24	36	32	33	27	30	31	28	32	25	23	33	28	31	33	30	37
TAJO	28	27	30	30	32	23	31	26	30	26	25	29	26	30	29	28	33
GUADIANA	29	27	28	28	31	21	26	28	34	28	27	29	28	28	31	27	29
GUADALQUIV.	32	26	26	32	34	23	24	30	30	28	29	31	22	29	29	21	31
SUR	26	25	28	37	32	21	34	30	32	29	29	32	26	25	36	22	35
LEV.-SUDESTE	28	27	29	34	24	27	31	25	32	31	29	34	23	27	27	31	33
PIR.ORIENTAL	28	29	30	34	34	20	29	29	25	33	26	30	30	29	36	24	32
V.ATLANTICA	26	32	30	36	31	27	29	26	28	23	25	33	26	31	27	27	35

TABLA I.-Test de Rachas a todas las cuencas y vertientes

contrastar el comportamiento de la cuenca total en relación con algunos observatorios internos. Ello permitirá valorar las distintas influencias que confluyen en la misma en los periodos extremos que presenta la variabilidad climática natural.

Para la determinación de la Precipitación Específica Media (PEM) se han considerado los volúmenes calculados, y publicados en  $\text{Hm}^3$ . La precisión en mm. será función de la superficie de cada cuenca; en el caso del Ebro, con  $86099 \text{ km}^2$ , se corresponde con 0,012 mm. por unidad de volumen,

**2. Medida de homogeneidad.-** En el análisis de homogeneidad se han seguido las técnicas generales; el resultado se presenta en forma de tablas para la más común: el Test de Rachas sobre la Mediana. Se ha realizado para todas las grandes cuencas y vertientes peninsulares para los totales mensuales o de periodos superiores (Ver Tabla I).

En la hipótesis de aleatoriedad simple se determinan los valores de la distribución del número de rachas para distintos niveles de significación. Para series con  $N > 100$  el número de rachas se aproxima a una Distribución Normal con parámetros:

$$k = N/2 \quad (1)$$

$$\mu = k + 1 \quad (2)$$

$$\sigma^2 = k(k+1)/(2k-1) \quad (3)$$

que permiten determinar los valores extremos aceptables para n.d.s. establecidos

En nuestro caso,  $N \leq 60$ , se han considerado para dos colas los niveles de significación de 0,10, de probabilidad inferior o superior al umbral del 5% en cada cola, con máximo de 37 y mínimo de 24, y de 0,05, con probabilidades del 97,5% y 2,5%, con extremos aceptables de hasta 39 y 22 (en primera aproximación. (Ver [2] y [3]).

El resultado es aceptable, con un nivel de confianza del 95%, en todas las áreas consideradas hasta el periodo mensual, excepto junio en las cuencas del Guadiana, Sur y P.Oriental, así como el verano en el Guadalquivir, donde se marca una tendencia o cambio, quizás en parte explicable por la evolución en número de estaciones.

Al nivel más estricto del 90%, se muestra una posible oscilación en marzo de la V. Mediterránea y posible tendencia en 8 de las 144 series mensuales tratadas. Este mismo signo se muestra en 5 de las 60 series estacionales o anuales como se puede comprobar en la tabla. En particular, para la cuenca del Ebro los resultados son aceptables a este nivel más exigente del 90% en todas las series, excepto en agosto.

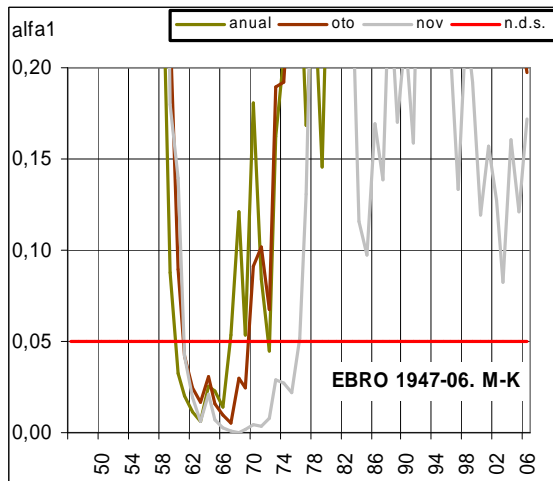
El test de Mann - Kendal, se ha elaborado con seguimiento de su evolución temporal, lo cual se presenta gráficamente en forma reducida para valores de  $\alpha = 0,2$  y solo para tres casos (Ver gráf. 2).

En él se observan posibles inhomogeneidades para el total anual de la cuenca del Ebro en la primera mitad de los años sesenta.

Ello se corresponde con el intervalo húmedo más largo e intenso del periodo que nos ocupa. Su origen está reflejado en la no homogeneidad del otoño para un periodo casi coincidente, aunque algo más largo, y el comportamiento del otoño aparece dominado por el de noviembre, cuando el periodo húmedo dura hasta 1976. También en octubre aparece posible no homogeneidad, con dos cortos periodos dentro de los sesenta, en que  $\alpha = 1$  es inferior a 0,05.

Una evolución similar se observa en las áreas superiores, las dos Vertientes y el total

peninsular, así como en todas las cuencas en mayor o menor medida.



Graf.2: Evolución de alfa-1 de Man-Kendal

Aparecen otras homogeneidades dudosas referidas a periodos menores, como junio de finales de los cuarenta, quizás inducidas por la reducida Red de entonces, y sobre todo las correspondientes a los meses de marzo, abril y junio desde 1989 hasta nuestros días, en forma discontinua y de corta duración.

Las pruebas con el test de Spearman, quizás demasiado estricto, marcan una clara tendencia en todas las series. Otros test de medida de homogeneidad relativa no se han considerado por diversas razones, fundamentalmente por razón de espacio.

**3. Función de Distribución Gamma.-** La función gamma fue introducida por L. Euler en el s.XVIII, a partir de la función

$$f(x) = t^{x-1} e^{-t} \quad (4)$$

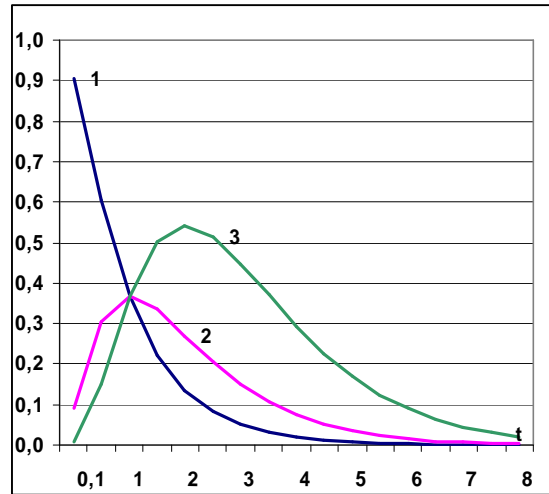
y aunque fuera desarrollada por él inicialmente en forma infinitesimal, como límite de una expresión discreta, con la expresión

$$\Gamma(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n! n^x}{x(x+1)(x+2)\dots(x+n)} \quad (5)$$

también obtuvo su expresión integral (Integral de Euler).

Se muestra la representación de  $f$ , para  $x=1, 2$  y  $3$ , (ver graf. 3); su integral expresa el área encerrada entre la función y el eje de abscisas  $t$ . En esencia no es mas que una extensión de la función factorial, que ya se utilizaba de antiguo, relativa a todo número  $x \in \mathbb{R}$ .

Posteriormente Cauchy, Hankel y sobre todos A. Legendre, a principios del s. XIX, la aplicó y calculó en forma de función integral para



Graf. 3: Función f(x)

cualquier número complejo cuya parte real es positiva, tomando la forma actual

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (6)$$

Dentro del campo real no tiene existencia para los números enteros negativos.

Se analizó la posibilidad de utilizar la función Gamma como una Función de Distribución de Probabilidades continua para el análisis de series de variables discretas; para ello se comprobó la necesidad de utilizar dos parámetros auxiliares,  $\alpha$  y  $\beta$ , que son función de los datos muestrales, estableciendo como nueva función de densidad

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad (7)$$

Para ciertas aplicaciones se hacía conveniente y necesario establecer límites a la integral, o bien inferior o superior. Así nació la F.d.D. Gamma-incompleta, que en el caso de límite inferior "a" y con parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , tendrá como función de distribución

$$G(x, \alpha, \beta) = \int_a^{\infty} g(x) dx \text{ para } x \geq 0 \quad (8)$$

En Climatología es de amplio uso esta distribución en el estudio de las precipitaciones, con la particularidad de tener la función límite inferior igual a 0, y siempre dentro del campo Real. Pearson K. desarrolló la función en forma de tablas [4]. Después se transformaron en tablas climatológicas por Thom [5], Sneyers[6] y vv.aa., muy útil durante muchos años, utilizando como estimadores de los parámetros los siguientes estadísticos de la muestra

$$T_1 = \ln \bar{x} \quad T_2 = \frac{\sum \ln x_i}{N} \quad (9) \text{ y } (10)$$

$$A = T_1 - T_2 \quad (11)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{(1 + \sqrt{1 + 4A/3})}{4A} \quad (12)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (13)$$

Con estos mismos estimadores, hoy disponemos de múltiples aplicaciones que nos suavizan los tediosos cálculos de antaño.

Y con estos medios nos adentramos en las aplicaciones prácticas de esta función que, ya se puede anticipar, ha sido utilizada en un orden de  $5 \cdot 10^4$  veces, en este estudio, así como la Distribución Normal de Gauss en un orden de magnitud menor.

Para los meses con ceros tan frecuentes en nuestros suelos, aunque no en el total de ningún mes de la cuenca que tratamos ni lógicamente en las áreas superiores, hay que utilizar el análisis de las partes

$$F(x, \alpha, \beta) = pG(x, \alpha, \beta) + q \quad (14)$$

donde q es la probabilidad empírica de los datos iguales a cero

$$q = \frac{n}{N+1} \quad \text{y} \quad p = 1 - q \quad (15) \text{ y } (16)$$

siendo n el número de ceros existentes en la serie, y N el número de elementos de la muestra.

#### 4.- Aplicaciones de F(x) para las áreas que nos ocupan.-.

Como primer paso se ha procedido a determinar los parámetros la F.d.D. Gamma para cada serie tratada. Con ellos y con el dato de precipitación correspondiente, dentro de cada serie y para cada año, se han elaborado las gráficas de la función de densidad que se representan a continuación. (Ver graf. 5 a 21).

Sobre estas gráficas se han incorporado los puntos correspondientes a cada dato de PEM y el valor teórico obtenido con la función del periodo que se representa. En ellas también se han incorporado los años en que se produjo los valores extremos de cada serie.

Posteriormente se han calculado los percentiles teóricos de cada elemento x de las muestras, con los parámetros anteriormente determinados a partir de la función  $F(x, \alpha, \beta)$ . Esto se ha hecho para todas las series originales y derivadas, y se presentan en forma de tabla (Ver Tabla II).

En ella aparece el comportamiento de cada mes, estación o año, en relación a toda la serie. Se

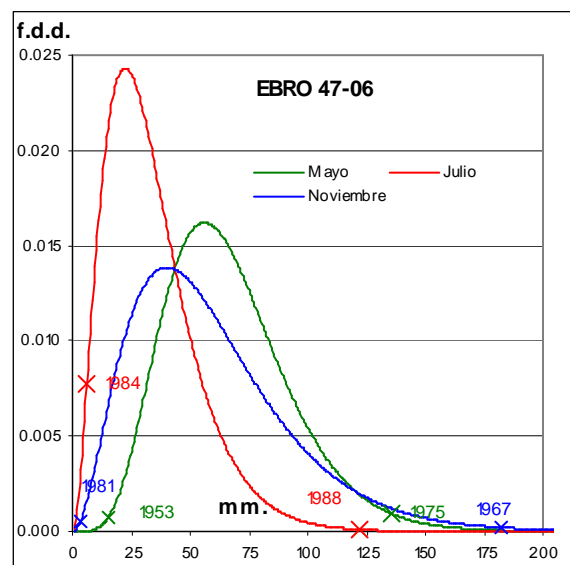
acompaña de una leyenda en colores para simplificar su visión. En ella se pueden localizar con relativa facilidad los periodos de comportamiento mas extremados correspondientes a la cuenca del Ebro, aunque reducidos por ahora al período mínimo del total mensual.

Las conclusiones del análisis de los mismos las dejamos al buen juicio del interesado. En realidad, es como una continuación de la “radiografía” de las precipitaciones presentado en [1] que ahora es como una “resonancia magnética” climatológica, profundizando en la determinación de los percentiles teóricos hasta el periodo mensual. Su extensión a periodos menores es un buen ejercicio para el futuro.

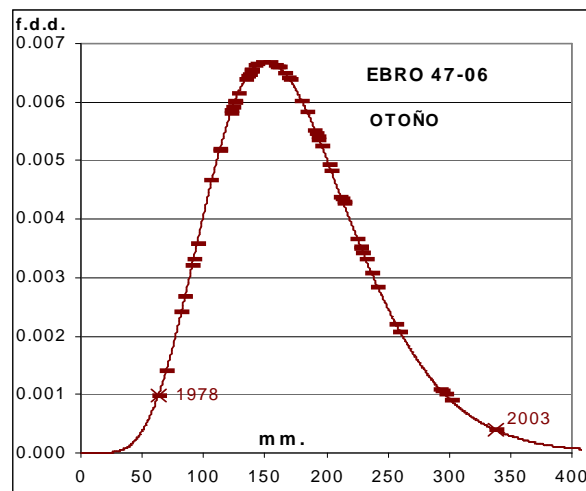
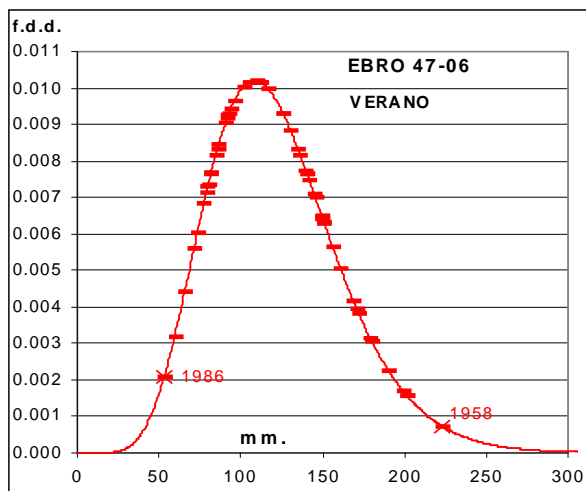
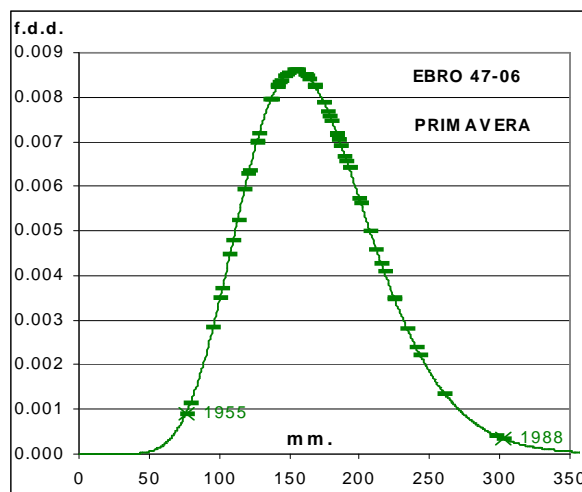
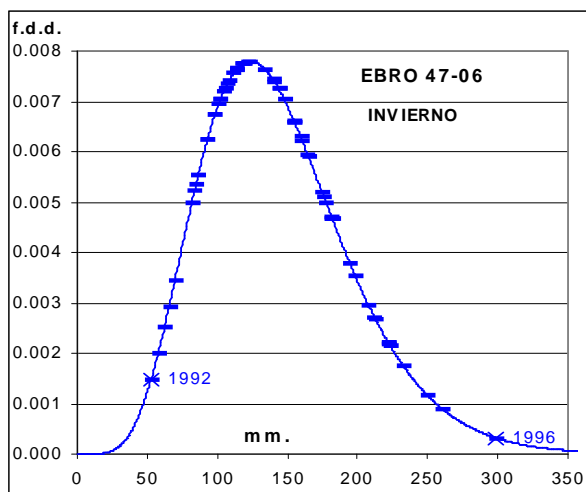
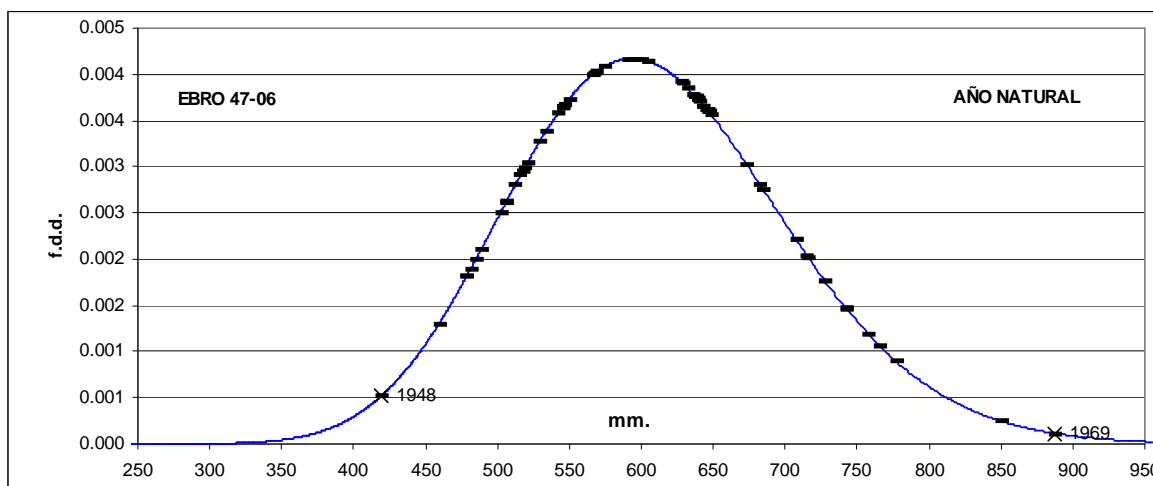
Excepto en algunos análisis de homogeneidad, hasta ahora se han tratado los datos de las series como conjunto único de 59 datos, para invierno y año hidrometeorológico, y de 60 datos en el resto de las series.

El objetivo era presentar una comparación del comportamiento de cada elemento dentro del conjunto de su serie, que será independiente de las posibles tendencias, bien por variabilidad natural o por cambios, que se hayan producido durante estos sesenta años; esos cambios o evolución serán motivo de secciones posteriores..

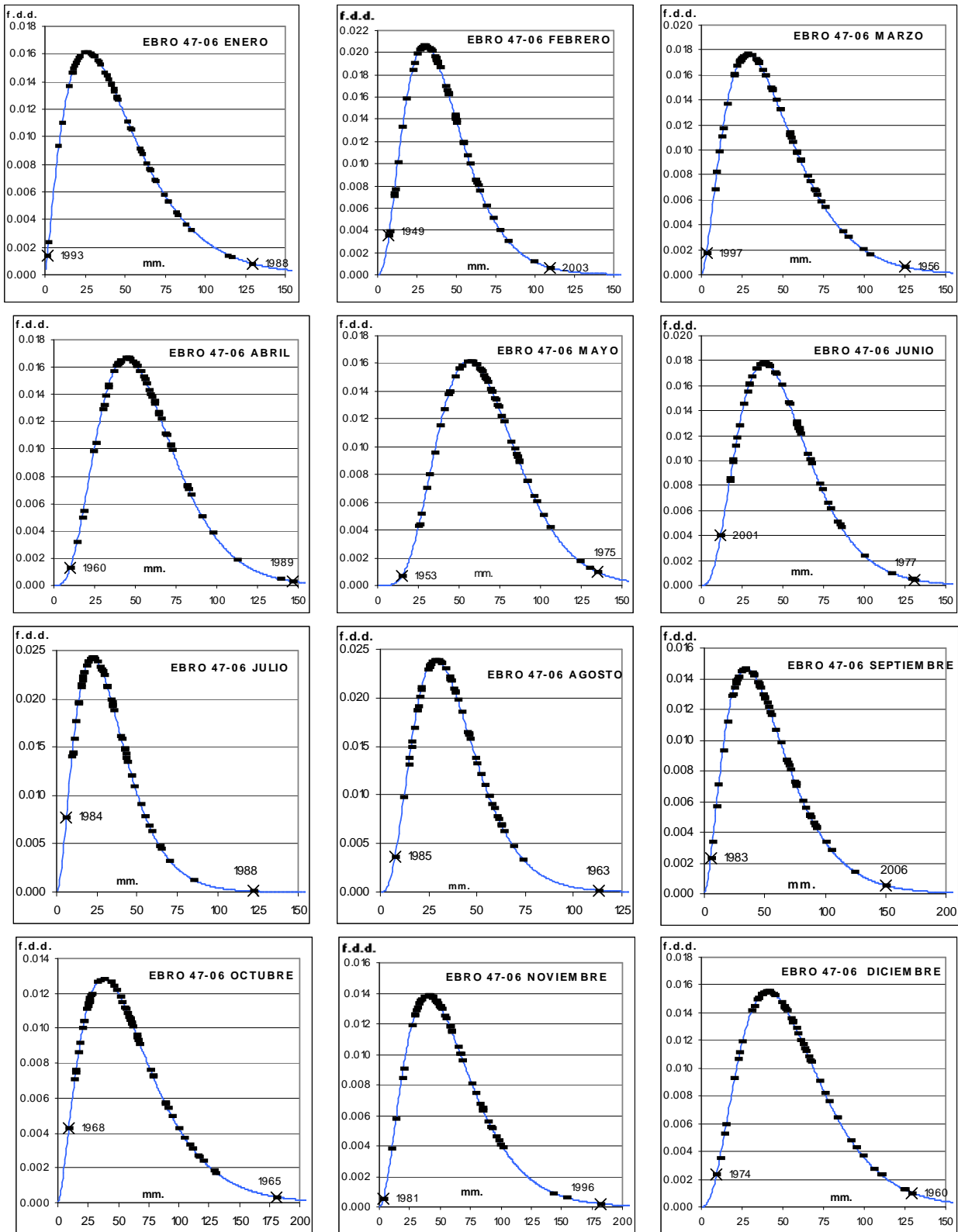
Otro objetivo importante es que pueda ser una buena base para comparaciones con observatorios internos de la cuenca y sobre todo para hacer una valoración de comportamientos futuros próximos, necesitando una actualización cada 5 o 10 años. Para mejor comparativa se unen en un gráfico los meses mas extremos (Ver graf 4).



Graf. 4: Función de densidad en meses extremos



Grafs. 5 a 9 : Función de densidad anual y estacional



Grafs. 10 a 21 : Función de densidad mensual

<b>EBRO</b>	EN	FB	MR	AB	MY	JN	JL	AG	SP	OC	NV	DC	AÑ	inv	pri	ver	oto	a.h.
1947	40	99	81	2	84	34	75	87	64	32	15	56	63		59	70	23	
1948	84	33	22	41	42	6	48	42	26	15	3	30	2	65	21	14	2	63
1949	15	1	63	9	59	48	60	70	92	15	46	38	17	3	33	58	58	2
1950	22	49	43	24	77	20	17	61	10	24	20	91	9	23	44	19	4	17
1951	76	69	70	67	87	78	46	78	79	63	46	47	86	89	84	74	65	8
1952	57	21	72	72	45	40	98	72	15	53	45	50	51	35	67	88	25	86
1953	26	50	7	48	0	99	16	25	59	83	1	80	28	32	1	88	45	50
1954	52	62	86	30	80	77	36	7	30	4	38	26	18	68	77	37	7	28
1955	88	84	23	3	9	90	90	84	38	57	28	84	65	77	1	95	30	17
1956	74	50	93	72	90	35	12	86	78	18	47	3	64	78	96	42	42	64
1957	16	47	23	67	87	99	9	57	28	60	21	20	38	6	66	91	23	63
1958	78	18	82	19	20	68	69	65	56	27	42	98	63	36	33	70	29	37
1959	21	60	96	47	79	67	79	70	99	88	79	90	100	83	92	77	98	62
1960	78	84	92	0	51	75	89	34	75	99	46	95	99	91	48	78	96	99
1961	66	3	6	61	66	36	44	52	85	64	98	24	66	74	36	34	96	99
1962	78	86	77	64	31	42	12	8	73	72	68	57	67	69	59	9	76	65
1963	78	75	60	68	3	83	72	91	85	11	80	56	79	75	27	91	66	66
1964	4	95	71	53	20	70	53	18	55	38	38	75	36	58	42	45	32	79
1965	57	48	77	14	5	18	34	39	86	93	81	69	66	62	16	16	95	35
1966	72	91	10	75	46	68	46	27	22	89	88	7	68	84	36	44	84	65
1967	35	41	41	44	13	7	25	31	17	50	100	25	26	12	16	6	90	67
1968	18	70	75	55	63	47	23	90	15	2	83	65	35	25	68	58	21	26
1969	54	70	96	99	53	67	54	16	87	62	34	67	94	63	99	42	67	34
1970	90	32	24	1	40	69	25	42	1	57	42	52	10	78	4	43	16	94
1971	73	28	70	96	98	82	84	26	73	15	66	84	95	52	99	77	46	10
1972	80	89	63	19	63	90	60	76	96	53	43	30	89	91	42	87	82	95
1973	42	33	5	29	29	91	53	58	29	18	25	66	8	23	6	81	8	88
1974	37	68	99	56	19	54	72	82	73	48	47	1	60	55	88	73	52	8
1975	46	53	84	59	92	69	6	89	74	5	51	61	64	13	91	62	31	60
1976	17	62	29	84	37	33	59	93	48	74	37	88	60	39	51	70	51	63
1977	88	42	42	51	97	96	93	51	4	74	23	56	85	88	83	96	22	59
1978	85	98	70	84	61	70	6	9	20	8	7	70	49	93	80	20	1	84
1979	98	85	75	60	66	40	40	27	52	90	35	29	86	97	72	24	71	48
1980	29	43	75	28	84	48	32	27	19	56	58	36	21	21	70	25	35	86
1981	40	51	39	89	7	27	29	27	59	17	0	95	13	32	43	14	5	21
1982	50	84	50	8	49	31	87	88	47	81	87	64	76	89	20	78	83	13
1983	0	62	27	56	3	41	62	100	0	10	88	36	16	28	10	94	22	75
1984	55	48	75	15	98	41	2	28	22	44	99	10	61	38	88	10	82	16
1985	57	51	50	39	75	11	79	1	2	16	52	34	5	27	53	13	7	61
1986	67	69	25	85	16	11	16	6	84	64	33	29	23	55	38	2	65	5
1987	65	61	25	36	20	20	93	13	21	94	56	56	45	47	11	44	76	22
1988	91	35	17	99	68	15	100	4	6	54	24	3	67	76	93	83	13	44
1989	6	78	26	92	41	9	53	80	41	7	80	50	27	11	63	38	34	66
1990	33	5	3	66	57	86	29	53	19	80	42	32	17	17	31	66	47	27
1991	15	69	87	75	19	8	29	11	87	58	74	9	35	26	71	4	82	17
1992	18	3	55	27	80	98	47	84	78	95	8	60	78	2	54	96	81	35
1993	0	24	35	72	70	40	6	71	78	86	18	36	27	12	61	28	72	78
1994	48	50	2	39	51	5	18	14	82	90	63	30	25	35	14	2	90	26
1995	56	37	22	17	25	23	34	53	40	5	56	97	14	32	7	23	16	25
1996	96	80	31	47	41	37	70	90	41	14	89	97	91	99	27	71	50	14
1997	97	1	0	50	78	87	95	95	30	11	85	94	91	96	31	98	37	91
1998	36	12	20	76	56	27	20	47	67	38	23	41	8	63	48	18	32	91
1999	48	29	77	63	61	42	92	40	88	58	57	22	64	30	72	67	75	8
2000	11	3	43	89	65	77	26	27	28	92	85	70	66	3	76	44	86	64
2001	85	8	85	31	29	1	81	18	46	41	41	1	9	66	49	16	30	66
2002	29	28	47	63	78	61	58	90	53	65	65	78	67	4	66	77	61	9
2003	80	93	56	45	79	35	20	58	88	92	81	40	93	91	62	26	96	66
2004	52	76	84	84	55	5	74	42	53	57	18	51	47	52	85	25	32	93
2005	19	31	17	38	47	37	7	35	45	80	77	33	14	22	20	14	75	47
2006	57	40	56	27	3	62	74	14	91	48	36	12	18	35	9	49	66	14

Tabla II.- Percentiles teóricos de precipitación en la cuenca del Ebro (1947-2006)

xx	p. Muy húmedo	xx	p. Húmedo	xx	p. Normal	xx	p. Seco	xx	p. Muy seco
----	---------------	----	-----------	----	-----------	----	---------	----	-------------



## 5. Medida del ajuste con la F. Empírica correspondiente.-

Hay que considerar que el comportamiento esperado de las ocurrencias reales sobre los deciles teóricos, con casos de ocurrencia irregular, muy baja o muy alta incluso en el total anual, no permitiría un ajuste por  $\chi^2$ , o sus conclusiones serían muy negativas.

Sin embargo, hay otros medios de medir la calidad del ajuste. Por ejemplo, es de destacar que el rango entre deciles de datos reales calculados es muy variable dentro de cada serie. Los rangos entre cada decil ,como participación del rango total de la serie expresados en %, son los que se muestran a continuación( Ver Tabla III).

El caso mas extremo de rango interdecilar es el 10º, correspondiente a la rama asintótica de la función, que llega a suponer el 48% del total en agosto, siendo a continuación los espacios 1º y 9º los mas extensos, lógico al estar en las ramas extremas de la función. Recordar que a mayor extensión de rango corresponde una menor concentración de datos, y viceversa.

El resto de espacios interdecilares no mantiene una regularidad, y cuando deberían tener un valor próximo al medio de 6.7 entre los espacios 2º y 8º aparecen rangos mayores con alguna frecuencia en los espacios 2º,6º y 8º, y rangos menores sobre algunas series en los espacios 3º,4º y 5º; el mas regular, el 7º, también muestra desviaciones importantes en enero y el Año. Ello puede indicar una malquerencia de la realidad con ciertos valores que habría que explicar, pero que por ahora nos permiten justificar las desviaciones anteriormente mencionadas entre determinaciones teóricas y empíricas, como se puede apreciar en los gráficos 5 a 21.

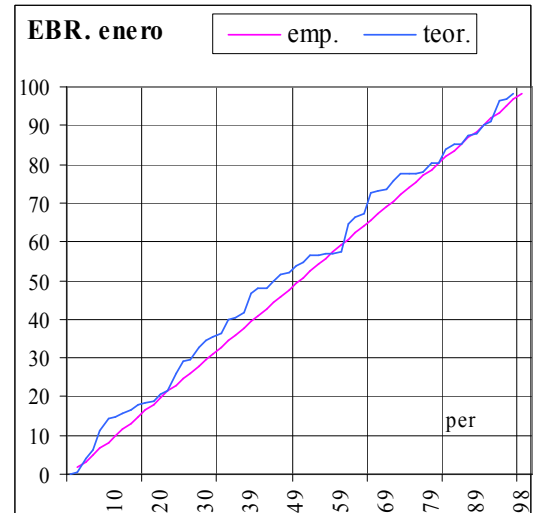
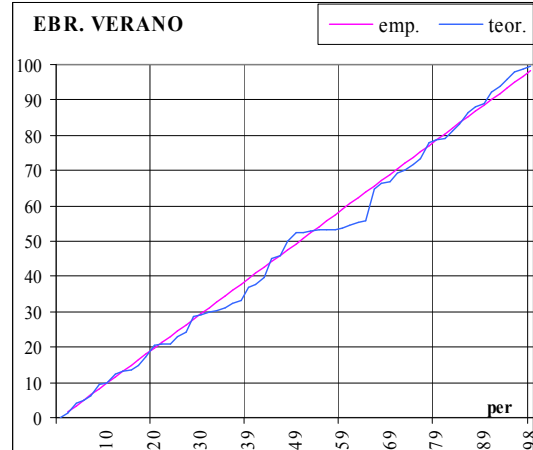
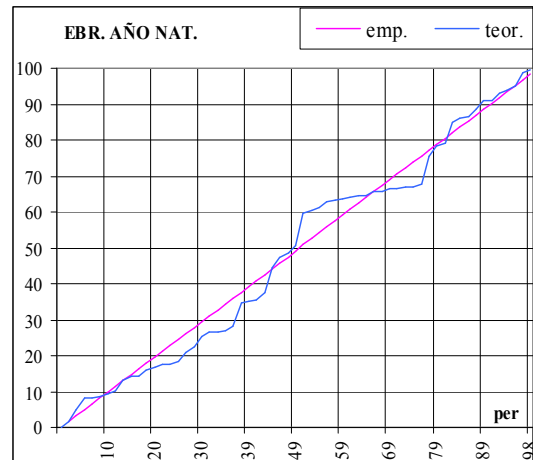
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	A	in	pr	ve	ot
1	12	6	8	12	14	8	5	8	10	6	13	11	14	12	14	12	10
2	2	14	8	8	10	7	4	5	5	4	3	10	7	8	8	5	11
3	7	3	2	4	7	7	3	4	4	5	5	3	6	3	7	6	5
4	5	5	7	5	6	2	3	4	6	9	3	3	5	4	5	9	3
5	5	3	6	3	5	2	5	5	6	5	2	8	10	9	4	3	7
6	3	6	9	4	5	10	5	4	6	2	4	4	5	6	7	14	10
7	12	5	6	3	5	5	6	7	9	7	6	7	2	8	5	6	7
8	6	9	5	5	7	6	4	10	9	11	10	11	8	9	8	6	7
9	12	10	9	13	9	15	14	6	6	13	7	23	13	10	12	15	12
10	36	40	41	41	32	39	51	48	40	38	47	20	31	31	31	26	28

Tabla III.- Rangos de interdeciles en %

Para mayor claridad se muestran gráficamente dos casos de máxima desviación, año y verano, donde la realidad se desvía mas de la determinación teórica, y uno de menor error, enero. (Ver grafs. 22 a 24)

Para el año aparecen ocurrencias concentradas de precipitaciones entre los

percentiles 45 y 68 (correspondientes a 605 y 627 mm.) y ausencias de ocurrencia en los intervalos de percentiles teóricos 38:44 y 68:75. Algo similar ocurre en el verano, en menor medida, con máxima ocurrencia entre 45 y 56 (165 y 176 mm.) y ausencias en gran parte del resto del 4º y 5º espacio.



Graf. 22 a 24 : Percentiles empírico y teórico

El mes de enero , como ejemplo de mínimas desviaciones en todo el rango de lluvias determinadas, no presenta grandes intervalos sin ocurrencia de lluvia excepto entre los percentiles 56 y 64 ( 177 y 187 mm.) y en los extremos, sobre todo en el superior, algo común a todas las series.



También se han determinado los errores entre percentiles reales y teóricos, mediante las diferencias existentes. La máxima desviación con diferencia positiva entre percentiles, es de 9.5, y se presentó en octubre de 1963; la mas negativa, de -8.9, fue en marzo de 1983.

Lo mas ilustrativo del buen ajuste lo obtendremos con la media de diferencias (calculadas - teóricas) de todas las series, que en el Ebro es de -0.4, con un máximo positivo en primavera de 0.9 y un mínimo de -1.4 en enero.

El error absoluto medio es de 2.5 de media para todas las series, variando entre 3.2, en la serie anual, y 1.1 en la primavera.

Las medidas de errores, que se dan en forma resumida, ya nos muestran de forma suficiente el campo de variación de las desviaciones entre la realidad y lo teórico.

## 6. Evolución con el tiempo de los parámetros de Gamma .-

En este apartado se trata de mostrar la evolución de las precipitaciones durante el periodo considerado y su relación con los estimadores de parámetros de la Función de Distribución . Para ello se ha analizado la evolución de los parámetros alfa y beta sobre series internas de 30 años consecutivos, variando cada serie y la siguiente en el primero y en el último elemento.

Se presentan en comparación con sus valores correspondientes a todo el periodo de 60 años, y con la evolución de las precipitaciones medias "normales" de la cuenca, o medias móviles simples, también de 30 años.

Se trata de mostrar la relación entre  $\alpha$  y  $\beta$  con los periodos de aumento o descenso de las precipitaciones. Para ello se acompañan gráficos correspondientes a las series estacionales, que son suficientemente ilustrativas.(Ver grafs.26 a 33) . En abscisas están los años final de cada periodo "normal" considerado.

El análisis de estos gráficos es suficientemente evidente para no tener que comentarlos; únicamente señalar que la relación entre cada uno de los parámetros con la media no es lineal evidentemente(Ver ecuaciones (9) a (13) ).

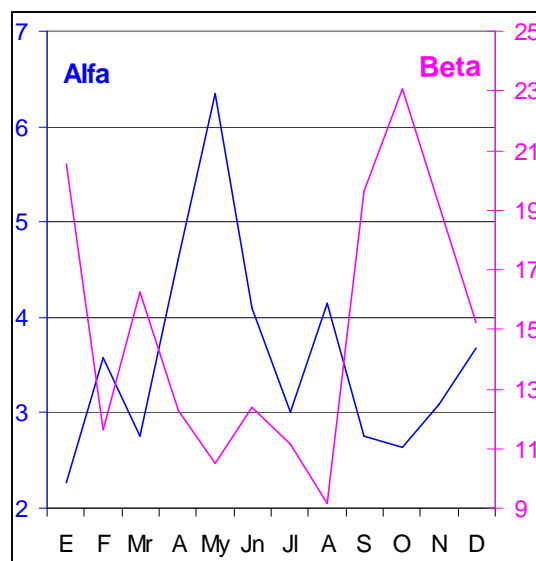
En los gráficos vemos que las variaciones se producen en forma de saltos, o persistencias bruscas, como veremos en la siguiente sección, o incluso puede ser por producido por un cambio en

Periodo	alfa		beta	
	Max.	Mín.	Máx.	Min.
Enero	3,75	1,61	29,32	12,17
Febrero	7,06	3,28	11,88	6,73
Marzo	3,41	2,26	18,08	12,29
Abril	7,2	3,56	17,3	8,58
Mayo	8,9	4,97	13,12	7,72
Junio	6,83	3,71	12,74	7,58
Julio	4,1	2,39	14,5	7,68
Agosto	6,54	3,01	13,11	6,04
Septiembre	2,97	1,92	27,29	16,04
Octubre	2,82	2,24	26,01	21,7
Noviembre	3,65	2,53	24,79	16,3
Diciembre	4,64	3,05	18,99	11,06
Año N.	51,87	34,9	11,97	11,42

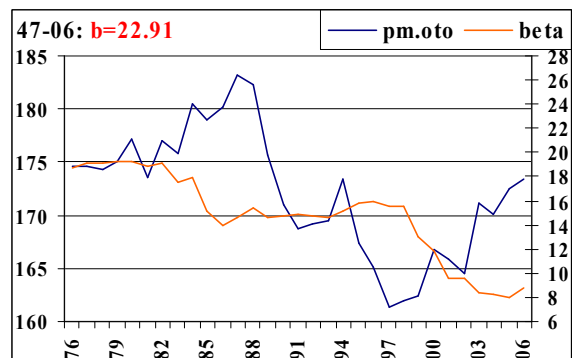
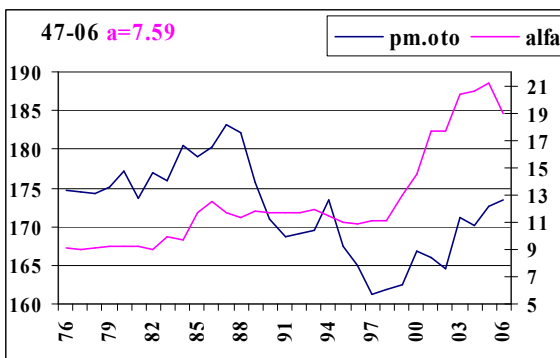
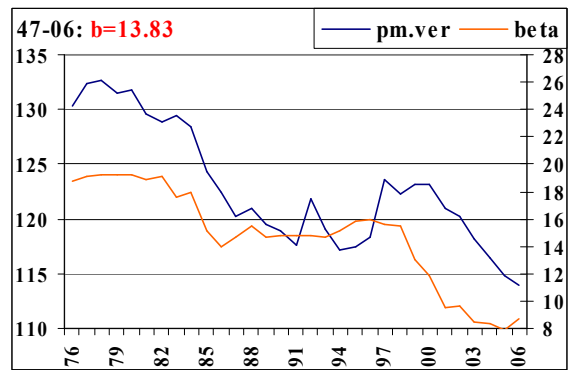
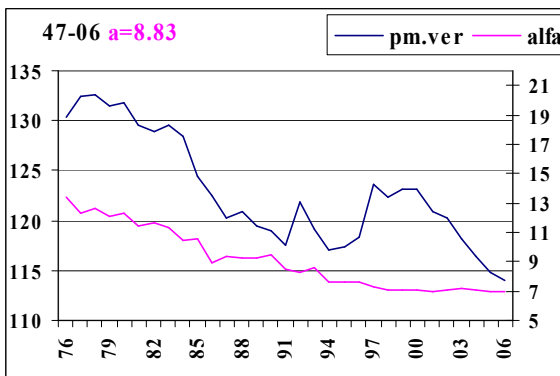
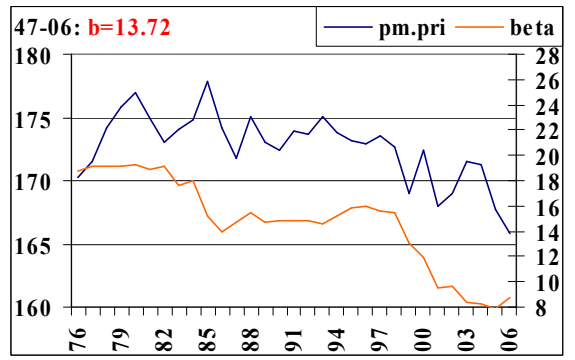
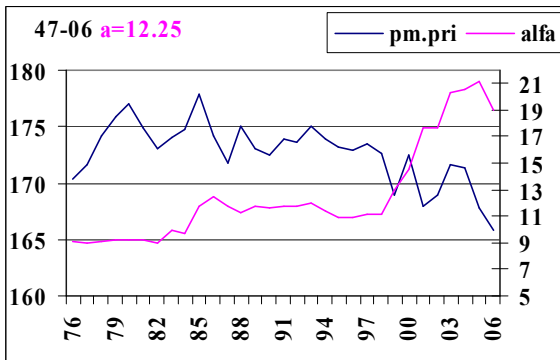
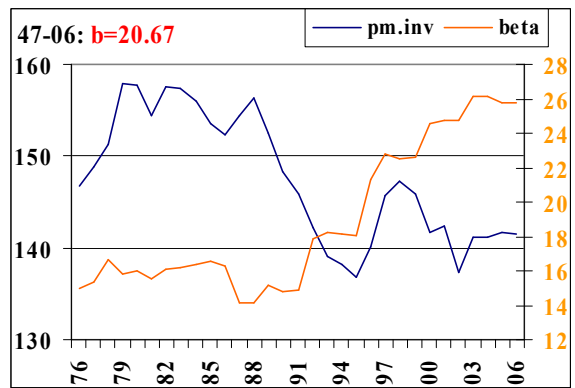
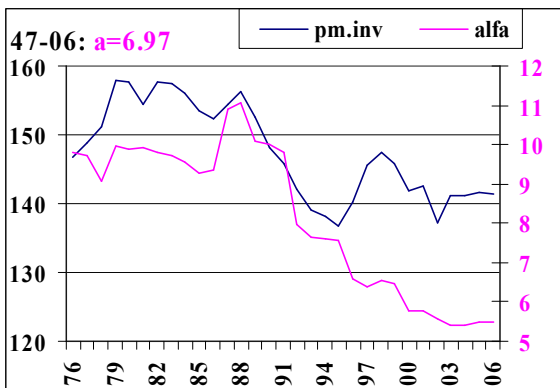
Tabla IV.- Valores extr. en series internas de 30 a.

la forma en que se están produciendo las precipitaciones, de menor duración y mayor intensidad.

La evolución de los estimadores para periodos diferentes al estacional se presentan en forma de tabla con los valores máximo y mínimo(Ver Tabla IV). El siguiente gráfico(25), presenta los valores de los estimadores de los parámetros de escala y de forma para todos los meses del año en la serie total.



Graf. 25 : Estimadores mensuales (1947-2006)



Graf. 26 a 33 : Evolución de alfa y beta con la “Precipitación media normal”

## 7. Determinación de la F.d.D. Gamma para distintos periodos de precipitaciones acumuladas : 3, 12, 24 y 36 meses.

Se han utilizado, por su buena presentación en la exposición, unos gráficos del índice de precipitación estandarizado (IPE), de muy frecuente uso hoy en día, [Ver Boletín de Coyuntura , [6] y varios].

Sin embargo, para una mejor disposición visual, se ha substituido la expresión en ordenadas en forma de abcisas de la Distribución Normal por la probabilidad real obtenida a partir de la Distribución Gammma, pero ahora corregida por un sencillo algoritmo; esto nos permitirá diferenciar fácilmente los periodos de superávit, en relación a la mediana de cada serie, de aquellos en que ha habido déficit, es decir cuando las precipitaciones han sido inferiores a la probabilidad 0,5 en cada serie, en términos de probabilidad teórica para cada dato real.

Obtenemos así el Índice de Probabilidad de Precipitaciones Acumuladas (IPPA), que puede ser de gran utilidad para el seguimiento de periodos húmedos y secos, con suficiente flexibilidad para afrontar los múltiples requerimientos que nos pueden llegar en este campo, y con una mejor imagen visual que conecta mas con la realidad o con comprensión mas directa para la generalidad.

En los gráficos aparecen por ahora los dos índices, con el fin de poder hacer comparaciones :

- La curva envolvente corresponde al IPPA, y su ordenada a la izquierda está expresada en "falsos" percentiles, de forma que cada punto de la curva +50 representa el percentil obtenido teóricamente que ocupará en su serie.

-La segunda curva, correspondiente al IPE con ordenada en la derecha, está expresada en unidades de desviación tipo de la D.N.

En el eje de abcisas se representa la fecha final del periodo de acumulación. Lógicamente no habrá datos en el inicio de la serie para los meses anteriores al periodo de acumulación considerado.

Se han tratado las acumulaciones de 3, 12, 24 y 36 meses, de las cuales se muestran en los gráficos siguientes la correspondiente a 3, 12 y 36. (Ver grafs. 36 a 39)

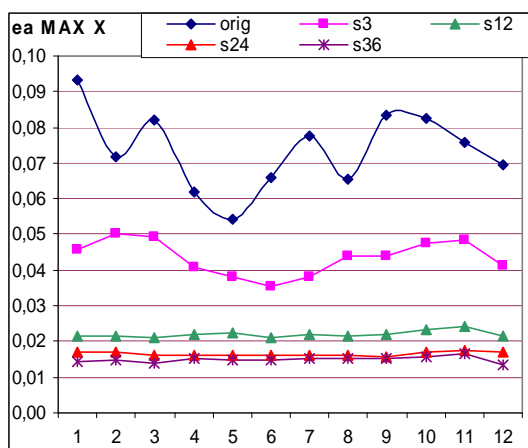
La acumulación de 3 meses será útil para el seguimiento estacional, o para otros periodos de 3 meses consecutivos; puede extenderse con facilidad al análisis de otros periodos superiores: dos o tres estaciones con fuertes anomalías (6 ó 9 meses), según las necesidades del estudio.

La acumulación de 12 meses nos mostrará la evolución de las precipitaciones en el año anterior al mes considerado para su análisis, en forma de probabilidad. En los gráficos 40 a 43 se

muestra la evolución de las precipitaciones en el Ebro, junto con las Vertientes Mediterránea y Atlántica, así como con el total de España Peninsular, relativa a los 60 años considerados.

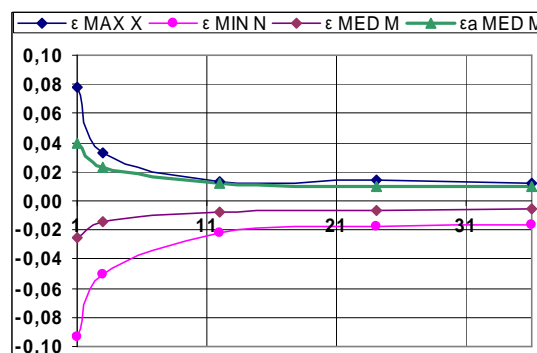
Los tres gráficos siguientes, 44 a 46, incorporan un observatorio y dos áreas superiores para 60 años, utilizando los parámetros de toda la serie, relativo a 36 meses, siendo el mas expresivo de posibles tendencias. Hay que tener en cuenta que Zaragoza, tiene una correlación muy baja con la cuenca total la mayor parte del año.

No se debe olvidar las desviaciones o errores entre los valores calculados teóricamente y el comportamiento real. Una muestra la tenemos en el graf. 34, donde se ofrece el valor máximo del error absoluto para cada mes en términos de probabilidad. El error absoluto medio de los 12 meses varía entre 0,039(orig.) y 0,009(s36).

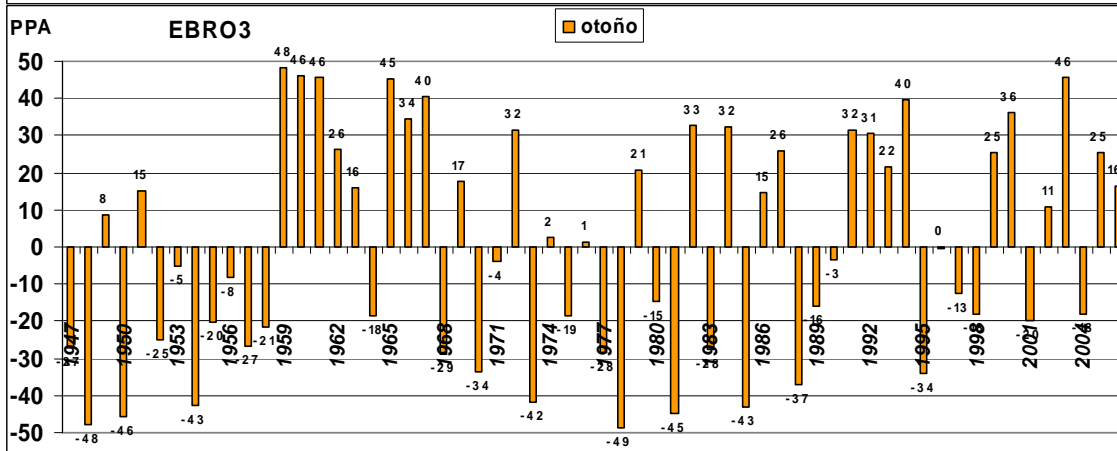
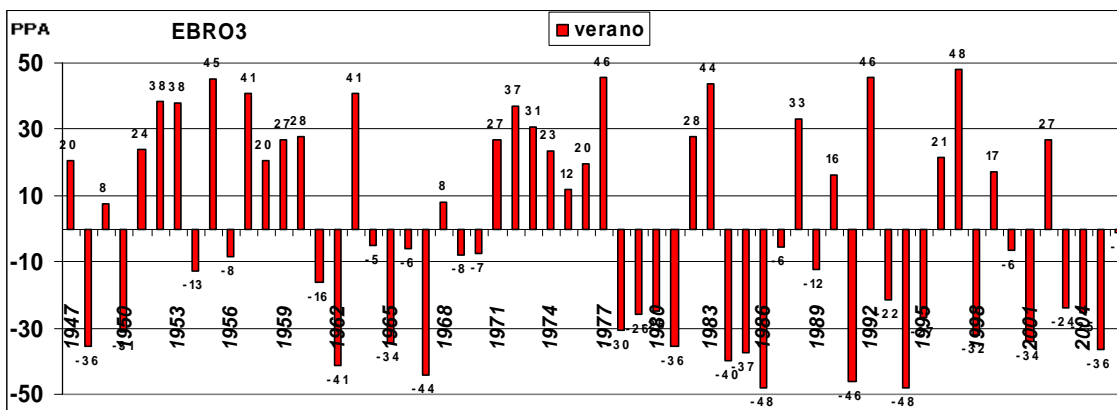
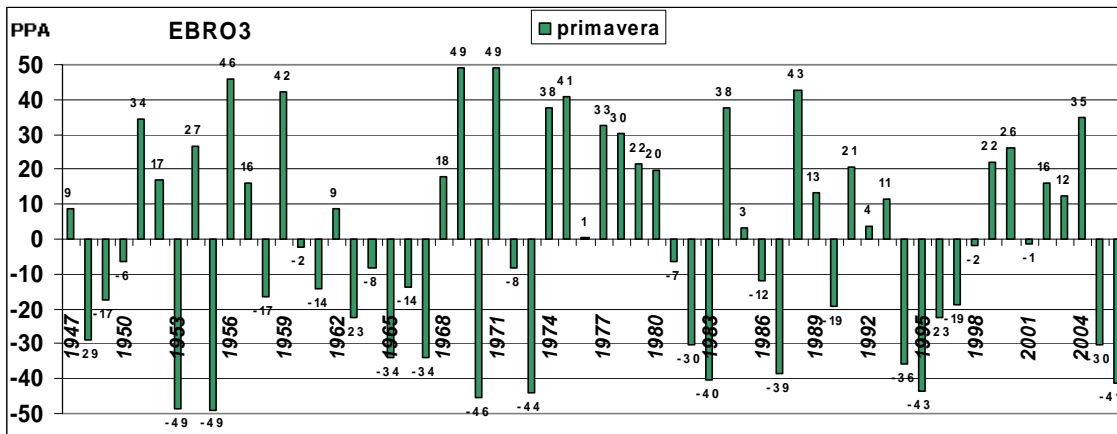
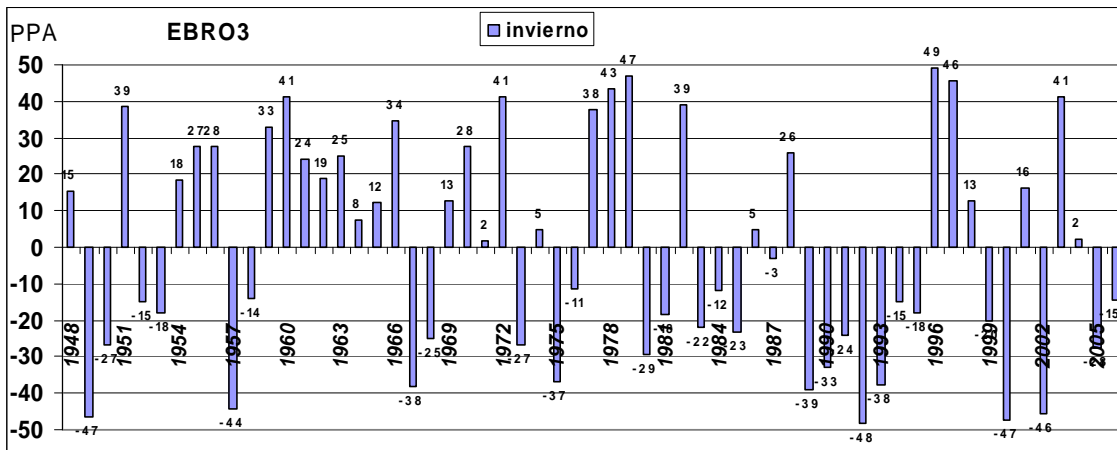


Graf. 34: Máximo EA para 1,3,12, 24 y 36m.

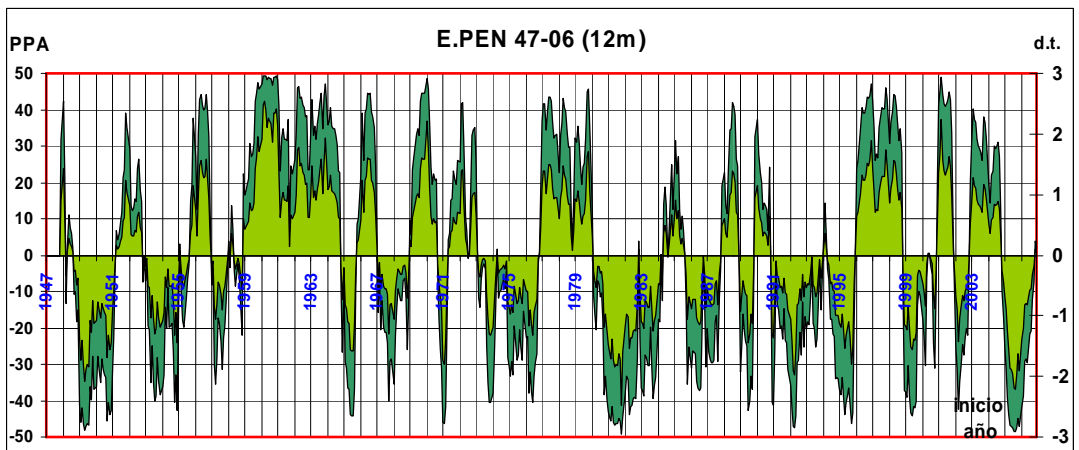
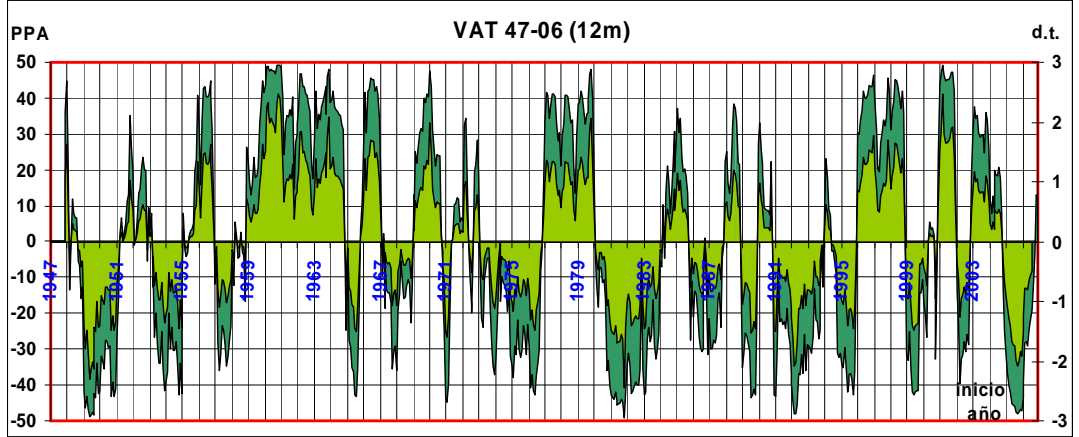
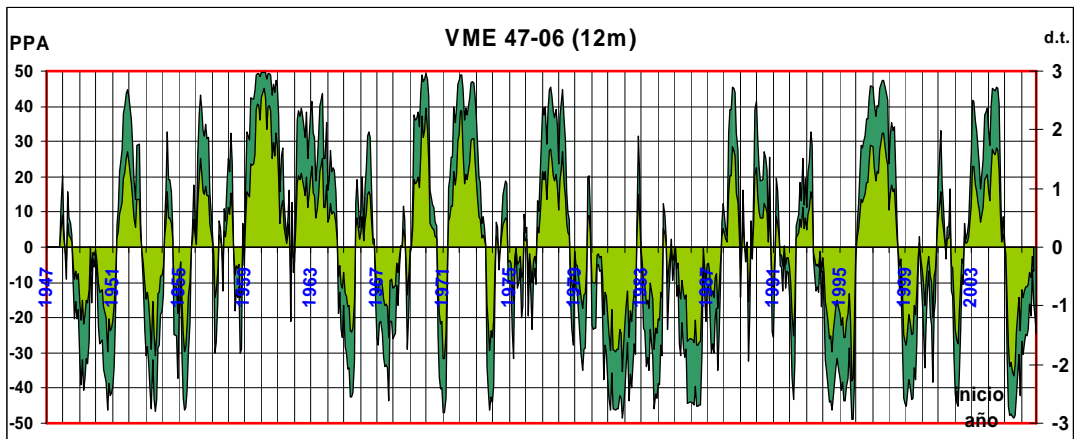
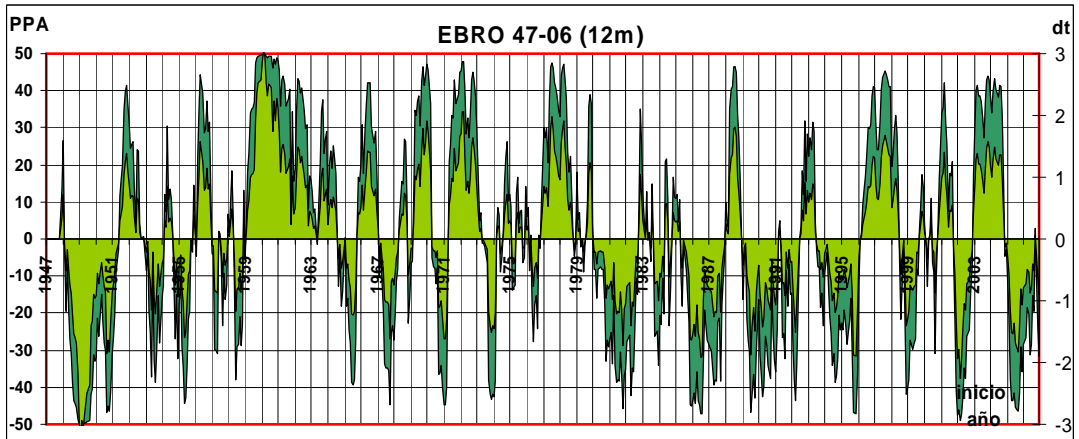
Aunque todo el estudio se ha realizado sobre Gamma, no hay que olvidar que, a partir de  $\alpha > 25$ , que en general se corresponde con mas de 24 meses de acumulaciones (variable con la zona climática), los errores normal y absoluto medios que incorporamos al hacer el tratamiento directamente con la D.N. son inferiores a 1%, tal como muestra el graf.35.



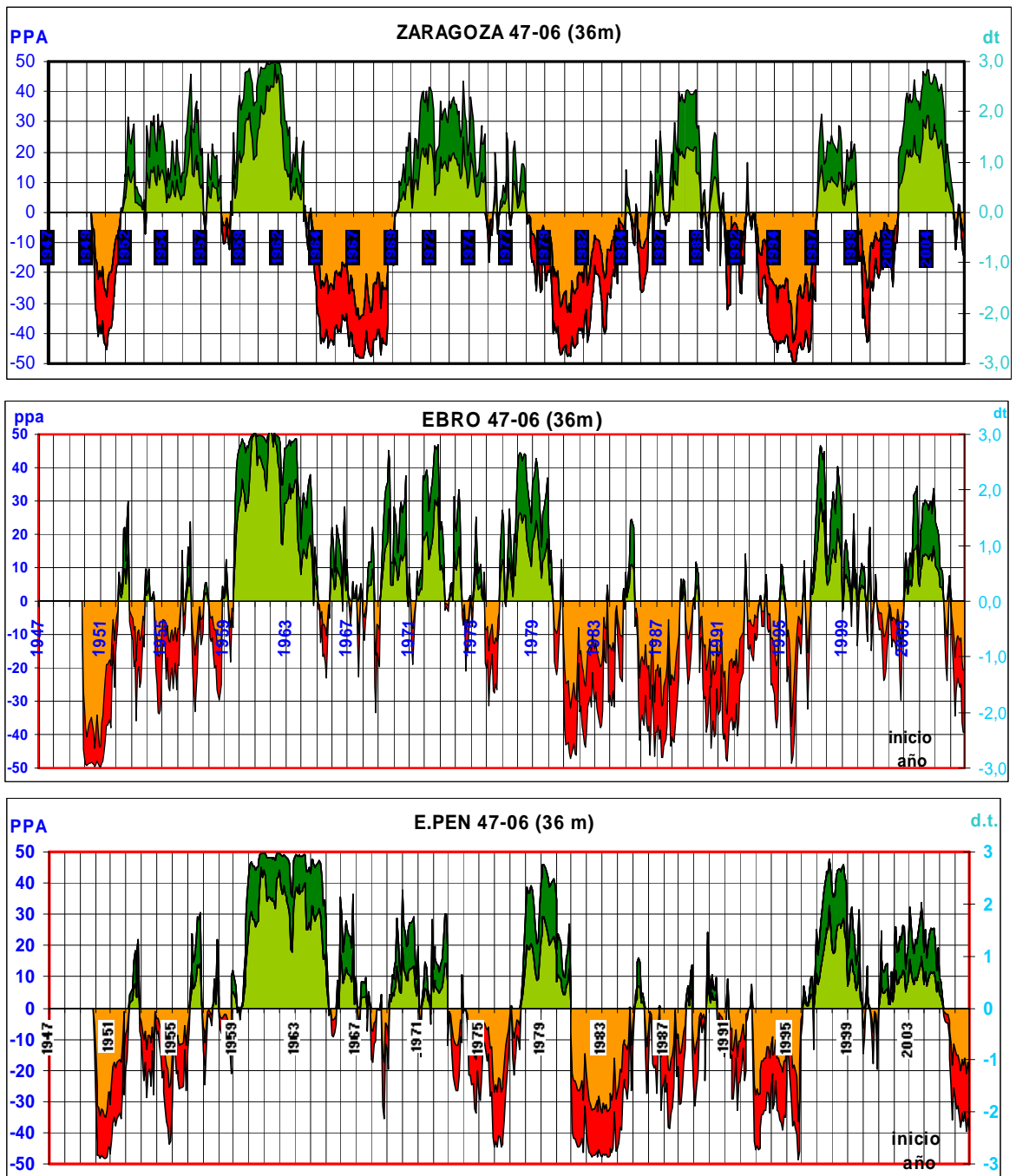
Graf. 35: Errores para 1,3,12, 24 y 36m.



Graf. 36 a 39 : Anomalías estacionales de probabilidad en el EBRO



Graf. 40 a 43 : Comparativa de 12 acumulaciones en áreas crecientes (709 puntos en cada curva)



Graf. 44 a 46 : Comparativa de 36 acumulaciones en distintas escalas espaciales (685 puntos)

### 8. Índice de periodos secos y húmedos.-

La mayor importancia del nuevo indicador IPPA la podemos desarrollar en su forma extendida  $IPPAmnn$ , donde  $mm$  sería el número de acumulaciones utilizadas y  $nn$  el número de veces consecutivas que el promedio del índice superara un umbral determinado de probabilidad.

El valor de  $mm$  variará con el estudio a realizar: Será menor de 12 para aplicaciones inmediatas, como abastecimientos, regadíos, etc.. Los valores entre 12 y 24 para canalizar posibles

repercusiones en el campo de las plantaciones, la distribución de aguas, su aprovechamiento

energético, etc. Los valores superiores a 24 para infinidad de campos, incluido el estudio del posible Cambio Climático. Con  $nn$  calculado calificaremos el evento húmedo o seco.

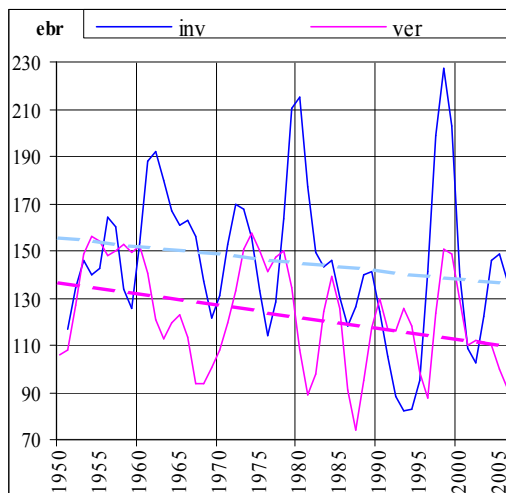
Se utilizará directamente sobre las probabilidades directas de Gamma, sin el algoritmo utilizado para hacer mas comprensible directamente su representación. Se podría trabajar con diferentes umbrales de aviso: 0.9 para localizar periodos extremadamente húmedos, 0.8 para periodos húmedos, 0.2 para muy secos y 0.1 para extremadamente secos. Todavía quedaría 0.95 y 0.05 para periodos extraordinarios y 0.98 y 0.02 para valores de efeméride práctica.

## 9 Análisis de media móvil ponderada.-

Por último no se podía dejar de caer en la tentación de valorar los cambios en las precipitaciones acaecidos en los últimos años.

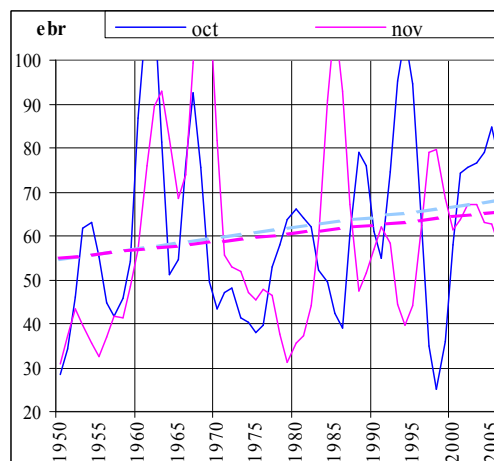
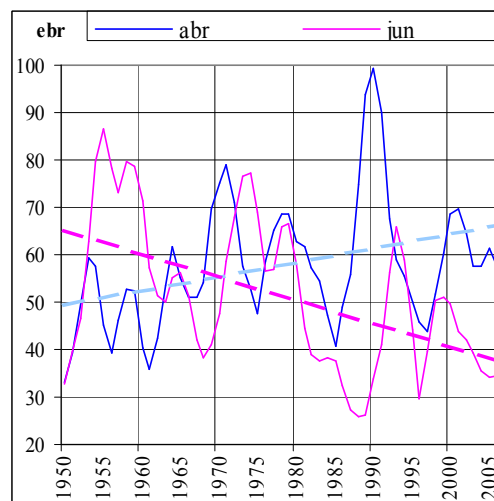
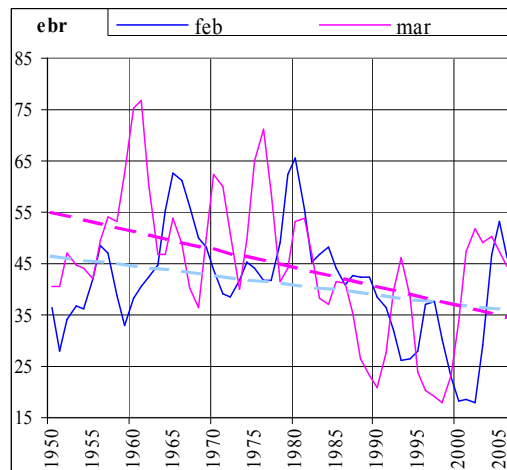
Con el fin de disponer de una mejor exposición gráfica, se calculado la media móvil ponderada de 4 elementos (0.5,1,1,0.5) y se ha calculado por regresión lineal simple la variación que se ha producido en los sesenta años considerados( reducida en 3 elementos).

Se han representado los datos para cada serie con la recta de regresión correspondiente. La multiplicidad de series nos obliga a reducir el número de gráficos a aquellos en que las variaciones positivas o negativas son mas sobresalientes. Se consideran tanto los meses como las estaciones y los años, y también reducidos a la cuenca del Ebro(Ver grafs.47 a 50). En ellos se representa la evolución y la línea de tendencia.



Para una comparación mas completa se han elaborado las variaciones en forma de tabla para todas las áreas peninsulares mayores. En las tablas V y VI), se muestra el incremento sobre la recta de regresión en los sesenta años, en % y en mm. sobre el dato origen .

Como cabía esperar, y ya se marcaba por otros estudiosos, el periodo considerado parece seguir siendo insuficiente, dominado por la influencia del largo periodo húmedo de los años sesenta, y habría que “esperar” al menos otros veinte años, disponer de una suficiente base reticular o profundizar con el tratamiento de series largas de observatorios contrastados.



Grafs. 47 a 50 : Evolución de P.movil4

Con ello podríamos encontrarnos unas tendencias quizás no tan agresivas. Es tarea que resta para un futuro próximo y fácil de realizar por los interesados en el tema.

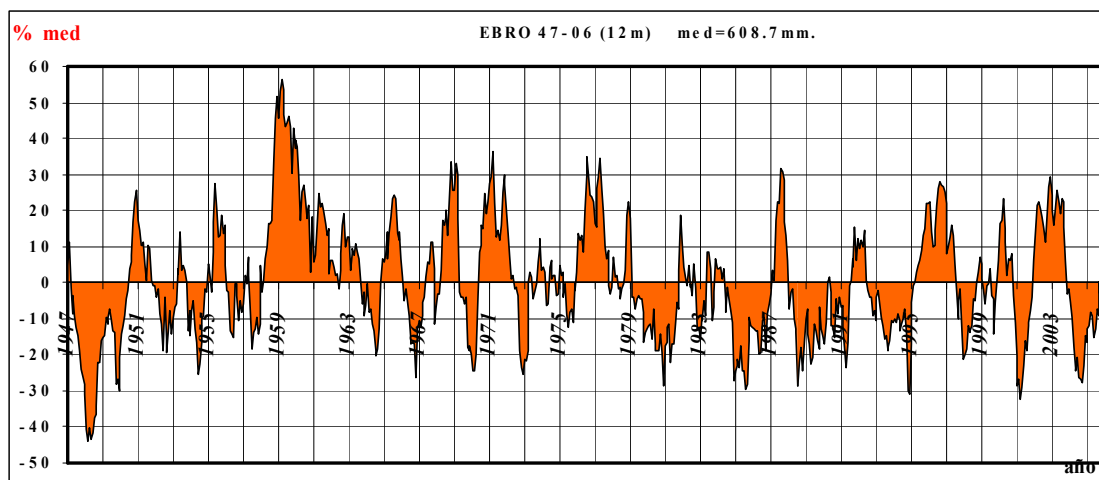


%	EN	FE	MR	AB	MY	JN	JL	AG	SE	OC	NO	DI	A.N.	in	pr	ve	ot	A.H.
<i>nnw</i>	-4,3	-18,7	-23,4	43,5	20,5	-41,0	43,8	-1,6	8,1	51,9	6,9	-0,5	3,8	-8,2	8,7	-10,9	21,3	2,4
<i>due</i>	-4,8	-41,9	-53,4	25,3	17,3	-49,9	13,8	59,9	-14,2	73,3	-10,2	14,9	-5,0	-9,6	-8,8	-16,5	12,7	-5,6
<i>taj</i>	-14,3	-47,7	-58,8	-1,2	-3,5	-43,2	36,3	21,3	-26,0	61,7	-0,6	0,9	-13,1	-20,6	-25,0	-17,7	12,3	-13,7
<i>gna</i>	-9,3	-42,0	-60,3	3,7	0,2	-38,9	25,2	-21,6	6,5	53,1	18,1	-0,6	-9,3	-16,0	-24,6	-26,1	28,1	-9,3
<i>gvir</i>	-6,1	-36,8	-57,9	-0,2	-0,9	-24,8	51,8	-16,0	11,6	46,9	7,6	6,3	-8,3	-9,7	-27,2	-14,9	21,8	-7,7
<i>sur</i>	-10,9	-16,5	-40,3	-43,2	-12,8	-9,5	76,5	-42,2	0,4	13,3	16,6	7,2	-9,9	-3,1	-35,5	-10,3	12,9	-7,5
<i>lse</i>	0,2	-3,1	-22,6	-6,7	8,8	-40,6	-8,1	-27,2	13,6	-25,8	31,0	-13,9	-8,3	-2,3	-6,2	-30,4	-0,2	-6,9
<i>ebr</i>	0,8	-22,6	-36,9	33,6	5,3	-42,4	8,7	-4,6	-13,1	24,4	18,3	-14,8	-4,7	-12,8	-0,1	-19,6	9,7	-5,9
<i>por</i>	99,2	-15,4	-55,3	23,9	-4,1	-35,8	-17,6	-8,6	-8,8	3,3	32,1	1,9	-4,3	21,4	-15,0	-21,7	5,9	-5,0
<i>pen</i>	-4,5	-31,4	-44,7	15,3	7,2	-41,3	16,7	-0,4	-4,2	37,4	8,8	0,1	-5,3	-10,7	-11,0	-18,6	15,0	-5,7
<i>vat</i>	-7,1	-35,5	-48,1	17,2	9,1	-42,1	31,2	11,4	-3,7	57,0	3,6	3,8	-4,9	-12,0	-12,7	-15,6	18,9	-5,4
<i>vme</i>	4,7	-15,7	-35,9	10,6	4,0	-40,2	1,2	-11,4	-4,9	2,1	22,7	-9,9	-6,2	-5,8	-7,3	-22,4	6,6	-6,2

Tabla V.- Incremento en % para la series (1950-2006)

mm	EN	FE	MR	AB	MY	JN	JL	AG	SE	OC	NO	DI	A.N.	in	pr	ve	ot	A.H.
<i>nnw</i>	-7	-27	-32	42	19	-32	15	-1	7	56	11	-1	49	-39	28	-18	74	31
<i>due</i>	-3	-29	-37	12	10	-27	3	9	-6	35	-8	10	-32	-20	-15	-15	21	-36
<i>taj</i>	-12	-42	-47	-1	-2	-18	4	2	-12	35	-1	1	-92	-52	-50	-11	23	-96
<i>gna</i>	-6	-32	-44	2	0	-12	2	-2	2	26	11	0	-54	-35	-42	-12	39	-54
<i>gvir</i>	-5	-31	-51	0	0	-6	2	-1	3	25	6	6	-52	-24	-51	-5	34	-48
<i>sur</i>	-8	-11	-29	-27	-5	-1	1	-2	0	8	12	6	-57	-7	-61	-2	20	-43
<i>lse</i>	0	-1	-9	-3	4	-16	-1	-6	5	-18	13	-7	-40	-3	-8	-24	0	-33
<i>ebr</i>	0	-11	-21	17	3	-28	3	-2	-8	14	11	-9	-30	-20	0	-27	17	-38
<i>por</i>	30	-7	-40	13	-3	-27	-8	-6	-7	3	18	1	-32	28	-30	-40	13	-38
<i>pen</i>	-3	-23	-34	9	4	-20	3	0	-2	23	7	0	-37	-24	-21	-17	27	-39
<i>vat</i>	-6	-32	-42	11	5	-19	5	2	-2	35	3	4	-37	-33	-26	-12	37	-41
<i>vme</i>	2	-7	-19	5	2	-21	0	-4	-2	1	12	-6	-36	-9	-12	-24	11	-37

Tabla VI.- Incremento en mm. para la series (1950-2006)



Gráf. 51 : Anomalías en % de la precipitación acumulada 12 meses (709 puntos)

Por último, el graf. 51 muestra las variaciones en precipitación acumulada de 12 meses, expresadas en % sobre la media total, para cada uno de los 709 meses disponibles. En los últimos 360 meses considerados las anomalías negativas son 221(el 61.4%) y las positivas 139(el 38.6%), lo cual es un indicador expresivo de la tendencia negativa en las precipitaciones de la cuenca. Porcentajes similares de , 61 y 39, los encontramos a nivel de observatorio(Zaragoza) en acumulaciones de 36 meses.

## 9 Conclusiones.-

Se han analizado las series derivadas de precipitaciones para una cuenca, con ligeras comparaciones con otras áreas grandes.

Muchas son las consecuencias que pueden obtenerse de las secciones anteriores. Pero la primera y principal es que mucho queda por desarrollar a nivel de observatorios individuales, de cuencas menores y de las islas para tener una verdadera valoración de las precipitaciones en España. El método de las aproximaciones sucesivas se nos muestra así con toda su evidencia para la Climatología, y la Meteorología en general, campos como tantos otros en que nunca dispondremos de la verdad absoluta.

La carencia de estaciones en algún periodo, y en alguna cuenca en particular, nos muestra incrementos o evoluciones poco aceptables (por ejemplo, ver un caso de enero en tabla V), pero hay que considerar que estamos en una aproximación mas.

La suavización incorporada a todos los parámetros con los datos originales, al referirse a un valor medio ideal de cada cuenca, deberá ser considerada al realizar un tratamiento individualizado por observatorios, o de uno de los varios climas que podemos encontrar en cada cuenca. al considerar áreas menores. Los parámetros de la F.d.D. serán mas extremos y los rangos de las variables serán mayores.

El tal vez excesivo número de gráficos, a pesar de las reducciones provocadas, se trata de compensar con la presentación en forma de mural de algunas series de gráficos completas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Gamo Baeza, A. *Sesenta años de precipitación en grandes áreas. Calendario Meteorológico 2008*, p253-259.

[2] López Díaz, J.A. y otros. *Homogeneidad y variabilidad de los registros históricos de precipitación en España. Serie monografías del I.N.M.* 1996.

[3] Thom H.C.S.. *Some methods of climatological analysis. O.M.M. n° 199.* 1966.

[4] Pearson K. . *Tables of incomplete Gamma Function. N.Y. Cambridge University Press.* 1956

[5] Sneyers R. *Sobre el análisis estadístico de las series de observaciones. N.T. de la O.M.M. n° 143.*1975.

[6] Garrido del Pozo, N., Buendía Moya G. y otros: *Caracterización y distribución de las sequías climáticas en la cuenca del Duero (1946-2005), Calendario Meteorológico 2008*, p235-242.