

CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS VARIABLES EN EL PROCESO SECUENCIAL DE LLUVIA

Juan Pablo Rebolé

Servicio de Infraestructuras Agrarias del Gobierno de Navarra
C/Alhóndiga 1, 2 Piso, 31002 Pamplona

José Javier López

Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural Universidad Pública de Navarra
Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona
jjlr@unavarra.es

Adela García

Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio da Vinci
Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba

Resumen: El objetivo de este artículo es la caracterización de las variables que definen la secuencia temporal de la lluvia (duración del evento de lluvia, duración del evento de no-lluvia, intensidad media de lluvia en el evento de lluvia, y distribución temporal de la cantidad de lluvia dentro del evento de lluvia) en un clima húmedo como es el de la zona costera de Guipúzcoa. El trabajo se realiza con dos series: la registrada en la estación meteorológica de Igueldo-San Sebastián (1926 a 1997) y la registrada en la estación meteorológica del aeropuerto de Fuenterrabía (1959 a 1997). Las variables se ajustan a las siguientes funciones de distribución: la duración del evento lluvioso a una función exponencial; la duración del evento seco a una distribución mixta exponencial; la intensidad media a la distribución Gamma y a la Weibull; y la distribución de la cantidad precipitada a la distribución Beta. La caracterización se realiza para un intervalo horario. Los resultados obtenidos muestran un buen ajuste en ambas series, y se comprueba que los ajustes de las duraciones mejoran cuando se incluye una corrección a los intervalos extremos de cada evento.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La lluvia es el resultado de una serie de procesos atmosféricos complejos sobre los que influyen numerosos factores. Esta complejidad hace que la simulación de la misma en una base física sea prácticamente inviable, obligando a acudir a esquemas estocásticos que se basan en algunas características observadas y que permiten la introducción de cadenas o procesos de Markov para explicar la ocurrencia de lluvia para distintos intervalos de tiempo (Todorovic y Woolhiser, 1975). Un enfoque intermedio entre las dos opciones citadas viene dado recientemente por el uso de una representación determinística fractal-multifractal para obtener modelos de generación de series temporales de lluvia mediante proyección de funciones de interpolación fractal (Puentes y Obregón, 1996). Esta posibilidad de que la lluvia puede ser entendida como un proceso caótico de baja dimensión ya fue apuntada por

Rodríguez-Iturbe *et al.* (1989).

Los modelos jerárquicos (cluster) son capaces de reproducir la alternancia de los períodos secos y lluviosos en base a la separación entre los orígenes de los cluster y de los elementos que los componen. La variación de la cantidad de lluvia recogida a lo largo de un suceso lluvioso vendrá dada por el solape de diferentes elementos del mismo o sucesivos clusters. Frente a esta estructura, otro enfoque presenta las cadenas de Markov de tres estados (Hutchinson, 1990), donde la separación entre lluvias vendrá dada por alguno de los dos estados secos definidos (estable-largo e inestable-corto). De este modo se intenta reproducir el fundamento de los modelos cluster (sucesión de frentes en el tiempo, cada uno de ellos compuesto de una serie de lluvias separadas por espacios secos cortos, separados a su vez por períodos secos largos), sin la complejidad teórica de éstos.

Algunos modelos incluyen características mix-

tas, como el aplicado por Martínez y Salas (2004), en el que se simulan lluvias horarias mediante una cadena de Markov simple de dos estados (seco y lluvioso) pero con algunos parámetros que varíen cíclicamente durante el día, lo que en algunos casos es más realista que los parámetros estacionarios.

También se utilizan las redes neuronales artificiales para caracterizar algunas características específicas de la lluvia que son difíciles de simular con los métodos clásicos de inferencia estadística, como puede ser la relación entre intensidad y duración de la precipitación, variables que se encuentran interrelacionadas de una forma muy imprecisa, sin una relación matemática exacta fácilmente enunciable (Palazón y García-Guzmán, 2004).

El proceso secuencial de la lluvia se puede definir como una serie temporal en la que se alternan eventos de lluvia (periodos en los que se registra lluvia) con eventos de no-lluvia (periodos en los que no hay registro de lluvia). Por lo tanto, los procesos básicos considerados a la hora de describir la ocurrencia de lluvia son dos: la alternancia de periodos lluviosos y secos con sus variaciones estacionales, y la distribución temporal de la precipitación dentro de cada episodio lluvioso.

En este trabajo, como paso previo a la simulación estocástica de la serie temporal de lluvia, se plantea caracterizar estadísticamente las variables involucradas en el proceso de secuencia temporal de la lluvia: duración del evento de lluvia, duración del evento de no-lluvia, intensidad media de lluvia en el evento de lluvia, y, por último, distribución temporal de la cantidad de lluvia dentro del evento de lluvia.

Es obvio, por otra parte, que la lluvia es un factor decisivo en el ciclo hidrológico, en cualquier sistema hidrológico representa la entrada al mismo. Así mismo, en el ámbito del diseño hidrológico también es vital tener bien caracterizada la lluvia, pero en este caso es crucial la intensidad, y cuanto más pequeña sea la cuenca más importante será caracterizar la intensidad de lluvia en intervalos de tiempo pequeños. Por lo tanto, la caracterización que se propone se realiza para intervalos de tiempo horarios.

El trabajo se realiza con las series de datos de lluvia horaria, registradas en la estación meteorológica de Igueldo-San Sebastián y en la del aeropuerto de Fuenterrabía, correspondientes ambas a un clima húmedo cantábrico como es el de la zona costera de Guipúzcoa.

MATERIAL Y MÉTODOS

Análisis preliminar de los datos

Como ya se ha comentado, se parte de dos series con registros de precipitación cada diez minutos, obtenidas por digitalización de las bandas del pluviógrafo de las siguientes estaciones: Estación meteorológica del Instituto Nacional de Meteorología de Igueldo-San Sebastián (serie de 71 años, desde octubre de 1926 a septiembre de 1997); Estación meteorológica de Hondarribia-Fuenterrabía Aeropuerto (serie de 37 años, desde octubre de 1960 a septiembre de 1997). Las series horarias se generan a partir de las de diez minutos, agregando los valores de precipitación registrada en diez minutos en intervalos horarios. Las lagunas de datos se depuran, eliminando los sucesos de lluvia y de no lluvia contiguos a las mismas.

Dado el carácter estacional de la lluvia se decide dividir el año hidrológico en dos periodos, uno considerado como "seco", y el otro como "húmedo". En ambos periodos se aprecian diferencias entre el tipo de precipitación: en verano o "periodo seco" predominan las lluvias de tipo convectivo o tormentoso, de mayor intensidad y menor duración; mientras que en el resto del año, en términos generales, las lluvias están asociadas a situaciones de procedencia marítima (cuarto cuadrante), siendo de mayor duración y menor intensidad. Esto queda corroborado mediante un test estadístico 2 de homogeneidad entre los datos del yetograma adimensional, se comprueba que no puede aceptarse una única distribución del mismo para todo el año. Para analizar este carácter estacional y establecer la discriminación entre ambos periodos se realiza un doble análisis: estadístico y numérico (método cluster). De esta forma, se establece el periodo seco desde junio a septiembre y el húmedo desde octubre a mayo.

El análisis estadístico se realiza, en cada serie considerada, para cada mes obteniendo las medias y varianzas de tres propiedades extraídas de los datos: intensidad de cada suceso de lluvia (mm/h), duración de cada suceso de lluvia (h) y duración de cada intervalo entre lluvias (h), de todo el rango de las series de datos.

El análisis numérico, para agrupar los meses homogéneos, se realiza mediante un análisis cluster. El proceso básicamente consiste en fijar un número de clusters o grupos (en nuestro caso se eligen 2, periodo seco estival y periodo húmedo el resto del año) y, a partir de un grupo único, cuyo centro tiene 8 coordenadas que son

		Igueldo			Fuenterrabía		
		Año	P. seco	P. hum.	Año	P. seco	P. hum.
Intensidad (mm/h)	med	0,96	1,08	0,91	1,06	1,22	0,99
	var	1,17	1,47	1,00	1,08	1,48	0,87
Precipitación por evento (mm)	med	3,19	2,65	3,46	5,21	4,88	5,34
	var	7,10	6,64	7,31	9,41	9,52	9,37
Duración llluvias (h)	med	19,67	23,66	17,99	24,90	31,73	22,25
	var	43,31	44,68	42,62	54,76	59,33	52,65
N. sucesos lluvia	med	393,95	116,33	277,62	306,07	85,40	220,67
Precipitación anual (mm)	med	1461,27	395,84	1068,75	1595,38	1427,52	1185,98

Tabla 1. Valores medios de las variables y sus varianzas

las medias de las respectivas coordenadas de los individuos, se van separando a los individuos de forma que la distancia entre el individuo y el centro del cluster elegido sea menor que la distancia entre el individuo y cualquiera de los otros centros. El análisis eligió los meses más adecuados para formar 2 grupos: G1 o seco con los meses 5, 6, 7, 8 y 9; y G2 o húmedo con los restantes meses. El mes de mayo (5) se puede asignar tanto al seco como al húmedo, debido a sus características intermedias se ha optado por incluirlo dentro del húmedo, ya que el análisis del tipo de precipitaciones muestra un predominio de las lluvias de tipo frontal frente a las convectivas, es decir, se asemejan más a las de invierno que a las de verano. En la Tabla 1 se muestra un resumen de las principales variables de estudio de la serie.

Corrección de las duraciones de los sucesos de lluvia

Las series discretizan las precipitaciones en intervalos horarios, por lo que en el primer y último intervalo del suceso de lluvia se produce una subestimación de la intensidad de la misma, al considerar que la precipitación comienza y acaba al principio y al final del intervalo respectivamente, cuando en la realidad el comienzo y final se dará en un punto intermedio del intervalo. Con el objeto de eliminar estas distorsiones, diversos autores (Acreman, 1990; García Guzmán y Aranda, 1993; y Castro, 1997) han propuesto una metodología para corregir las duraciones de los intervalos de lluvia.

Como el instante de inicio y de fin de la lluvia son aleatorios, se ha considerado que las duraciones de las horas inicial y final son aleatorias con Distribución Uniforme $(c/2, 1 + c/2)$, en lluvias con más de una hora de duración, y $(c/2, 1 + c)$, en lluvias de una hora. Al ser desconocidas las duraciones "reales" de las horas extremas de cada lluvia, se estiman por su valor

medio: $(g+h)/2$, donde g y h son los parámetros de la Distribución Uniforme (g, h) .

El parámetro c es el tiempo mínimo necesario para que se registre una cantidad apreciable de lluvia. Su valor numérico varía de una lluvia a otra ya que depende de la intensidad de la misma y de la sensibilidad del aparato utilizado para registrarla. En este trabajo, los datos tienen un umbral de precipitación de 0,1 mm y la intensidad de cada lluvia se ha estimado como la intensidad media de sus horas centrales:

$$c = \frac{0,1}{\bar{q}} \quad \bar{q} = \sum_{j=2,n} \frac{q_j}{(n-1)} \quad (1)$$

siendo q_j cantidad precipitada en la hora j y $n+1$ la duración total de la lluvia.

Como no existen horas "centrales" en lluvias de 1 ó 2 horas se estima un valor único para todas ellas, utilizando la media de la hora central de todas las lluvias de 3 horas:

$$c_3 = \frac{0,1}{\bar{q}_3} \quad \bar{q}_3 = \sum_{j=1,m_3} \frac{q_{3j}}{(m_3)} \quad (2)$$

siendo m_3 el total de lluvias de 3 horas y q_{3j} cantidad precipitada en la hora central de la j -ésima lluvia.

De la definición de c en (1), se deduce que en lluvias de más de una hora, la duración corregida nunca es superior a la registrada; en general es menor, y sólo si todas las horas centrales tienen una precipitación igual a su umbral (0,1 mm) ambas duraciones son iguales.

La corrección de las duraciones de los sucesos lluviosos implica modificación en el resto de las variables que se analizan en este trabajo. La duración de los sucesos secos se incrementa en lo que se acortan los sucesos de lluvia contiguos, o viceversa, de forma que el tiempo total de registro en la serie modificada sea el mismo que

en la serie sin modificar. La intensidad media de cada lluvia cambia, al cambiar su duración y permanecer invariable la cantidad precipitada. Por último, la distribución de la precipitación en cada lluvia también se ve afectada al modificarse tanto la duración de la misma como su intensidad media.

Caracterización estadística de la serie temporal

Como ya se ha comentado con anterioridad el objetivo de esta comunicación es la caracterización estadística de la serie temporal. Ésta se basa en la sucesión de eventos de lluvia y eventos secos o sin lluvia. Los primeros se caracterizan mediante las siguientes variables: intensidad media horaria de cada evento o lluvia; distribución de la precipitación dentro de la misma; y duración del evento o lluvia. Los segundos, eventos secos o periodos entre lluvias, solo se caracterizan mediante una variable que es la duración de dicho evento. No obstante, en este caso se puede hacer una diferenciación entre periodos secos estables o inestables: el estable (0) hace referencia a los intervalos sin lluvia que separan frentes; el inestable (1) se corresponde con los periodos entre eventos de lluvia que se producen dentro de un frente. La intensidad media se ajusta a una distribución Gamma y a una Weibull. La distribución de la precipitación a la distribución Beta (García-Guzmán y Aranda, 1993). Las duraciones de los eventos de lluvia se ajustan a una distribución Exponencial y las de los periodos entre lluvias se ajustan a una distribución Mixta Exponencial como consecuencia de la diferenciación entre periodos estables e inestables. Los parámetros de las funciones de ajuste se estiman, a partir de las series históricas, mediante el método de máxima verosimilitud y el de momentos.

Ajuste de la distribución de la precipitación en cada lluvia

Dado que las series de precipitación de larga duración disponibles son en general escasas, es de especial importancia simular la estructura interna del proceso de lluvia. Arnold y Williams (1989) asumen que dentro de cada suceso de lluvia la distribución de la precipitación sigue una distribución exponencial. En nuestro caso se analizará la distribución de la cantidad de lluvia con el modelo de García-Guzmán y Aranda (1993), mejorado por Castro et al. (2005)

Para caracterizar de forma homogénea las lluvias de diferente duración y volumen es preciso

adimensionalizarlas. De esta forma, la lluvia recogida en el intervalo $(0, \tau)$ se expresa como una proporción de la lluvia total recogida en el intervalo $(0, T)$. Cuando el tiempo se expresa también en forma adimensional, $t = \tau/T$, se puede obtener una representación gráfica de la precipitación $H(t)$ conocida como *yetograma adimensional acumulado* (Huff, 1967), donde $H(t)$ es la fracción de la lluvia recogida en el intervalo de tiempo $(0, t)$. En este trabajo únicamente se adimensionaliza la cantidad de lluvia $H(t)$, considerando variable el número de intervalos de tiempo en que se divide la lluvia e igual a la duración de la misma (García-Guzmán & Aranda, 1993; Castro, 1997).

Para una lluvia de $n + 1$ horas se describe la lluvia adimensional acumulada, $H(t_1) < \dots < H(t_j) < \dots < H(t_n)$ en la que $t_j = j/(n + 1)$, como una muestra ordenada de tamaño n de la distribución Beta con parámetros α y β . La función de densidad de esta variable es

$$f(H) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} H^{\alpha-1} (1 - H)^{\beta-1} \quad (3)$$

$$0 < H < 1, \alpha > 0, \beta > 0$$

donde $\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$.

En este trabajo se propone la caracterización adimensionalizada mediante un yetograma adimensional acumulado tomando como unidad de medida el intervalo horario. De forma general, el criterio de selección de eventos lluviosos para este ajuste es que dicho evento tenga más de tres intervalos de tiempo con lluvia ya que por debajo de ese valor la representación de la distribución de la lluvia podría quedar distorsionada, es decir, se seleccionan todos los eventos lluviosos de más de tres horas. Por otra parte, el criterio de separación de eventos que se ha seguido es que al menos entre dos eventos de lluvia haya, al menos, un intervalo de tiempo sin lluvia, es decir, una hora.

Tal como se ha indicado anteriormente, hay que tener en cuenta que en la primera y última hora de cada suceso de lluvia se produce una subestimación de la intensidad de lluvia, efecto que se acentúa cuanto menor es la duración de la misma. Por ello, se propone aplicar la corrección de las horas extremas explicada en el apartado anterior.

Las duraciones de los eventos de lluvia con la corrección de las horas extremas proporciona la serie correspondiente de las fracciones de lluvias H_i , que se ajustan a la distribución Beta

con parámetros α y β , para los períodos seco y húmedo. La estimación de los parámetros se ha realizado utilizando el método de los momentos (García-Guzmán & Aranda,1993; Castro, 1997).

Ajuste de la intensidad de lluvia

Esta variable, i_m , se define como el cociente entre la altura de precipitación recogida en el suceso de lluvia y la duración del mismo. Está más o menos contrastado en la bibliografía que esta variable, i_m , se puede ajustar a una distribución Gamma cuya función de densidad es:

$$f(i_m) = \frac{\lambda^\mu}{\Gamma(\alpha)} i_m^{\mu-1} e^{-\lambda i_m} \quad (4)$$

$$i_m > 0, \mu > 0, \lambda > 0$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx$$

donde μ y λ son los parámetros de la distribución, cuya estimación se ha realizado por el método de los momentos y por el método de máxima verosimilitud.

Otra función de distribución a la que se suele ajustar bien la intensidad de lluvia es la Weibull, cuya función de densidad es:

$$f(i_m) = \mu \lambda i_m^{\mu-1} e^{-\lambda i_m^\mu} \quad i_m > 0, \mu > 0, \lambda > 0 \quad (5)$$

donde μ y λ se obtienen también por el método de los momentos, y por el de máxima verosimilitud.

Ajuste de la duración de los sucesos lluviosos

Esta variable, v_h , se define por la duración en horas de los acontecimientos en los que se produce precipitación por encima del umbral de medida ($\geq 0,1$ mm). En general las duraciones de los eventos o sucesos, ya sean lluviosos o inter-lluviosos, se ajustan bien a funciones de distribución de tipo exponencial, en este caso simple tal como:

$$f(v_h) = \lambda_h e^{-\lambda_h v_h} \quad v_h > 0, \lambda_h > 0 \quad (6)$$

donde λ_h es el parámetro de la función exponencial, que se estima por máxima verosimilitud:

$$\hat{\lambda}_h = \frac{n}{\sum_{i=1,n} v_{hi}} \quad (7)$$

siendo n es número total de sucesos lluviosos de la serie.

Ajuste de la duración de los sucesos secos inter-lluvias

La variable, v_s , se define por la duración, en horas, de los acontecimientos en los que no se produce precipitación, o si se produce, está por debajo del umbral de medida ($< 0,1$ mm). Es interesante, en este caso, hacer la diferenciación entre los que se asimilan a los intervalos sin lluvia entre frentes, sucesos que denominaremos secos estables (0), y los que se dan entre lluvias dentro de un mismo frente, sucesos secos inestables (1). La serie de duraciones de períodos secos son tiempos de permanencia en los estados 0 ó 1, con distribuciones exponenciales de parámetros λ_0 ó λ_1 . La duración de los eventos secos o inter-lluvias, v_s , la ajustaremos, por lo tanto, a una mixtura de dos distribuciones exponenciales, cuya función de densidad es:

$$f(v_s) = p\lambda_0 e^{\lambda_0(v_s)} + (1-p)\lambda_1 e^{\lambda_1(v_s)} \quad (8)$$

$$v_s > 0, \lambda_0 > 0, \lambda_1 > 0, 0 < p < 1$$

siendo p un parámetro que representa la proporción de sucesos secos estables (datos que pertenecen a la exponencial de parámetro λ_0); y $(1-p)$ representa la proporción de eventos secos inestables (datos de la exponencial de parámetro λ_1).

En el caso de las series corregidas, es decir, en las que se realiza la corrección de las horas extremas de los sucesos lluviosos, todas las duraciones de los periodos secos, v_s , resultan superiores a la unidad, ya que al corregir las duraciones de las horas extremas de las lluvias con el método descrito, se disminuye su duración, incrementando en la misma medida los sucesos contiguos. Por lo tanto, en este caso se utilizará una mixtura de dos distribuciones exponenciales truncadas, cuya función de densidad es:

$$f(v_s) = p\lambda_0 e^{-\lambda_0(v_s-1)} + (1-p)\lambda_1 e^{-\lambda_1(v_s-1)} \quad (9)$$

$$v_s > 0, \lambda_0 > 0, \lambda_1 > 0, 0 < p < 1$$

Para estimar p , λ_0 y λ_1 se utiliza el método de máxima verosimilitud, donde el neperiano de la función de verosimilitud para la muestra v_{s1}, \dots, v_{sn} , siendo n es el número de sucesos secos totales, es:

$$\ln(L) = \sum_{i=1}^n \ln[p\lambda_0 e^{-\lambda_0(v_s-1)} + (1-p)\lambda_1 e^{-\lambda_1(v_s-1)}] \quad (10)$$

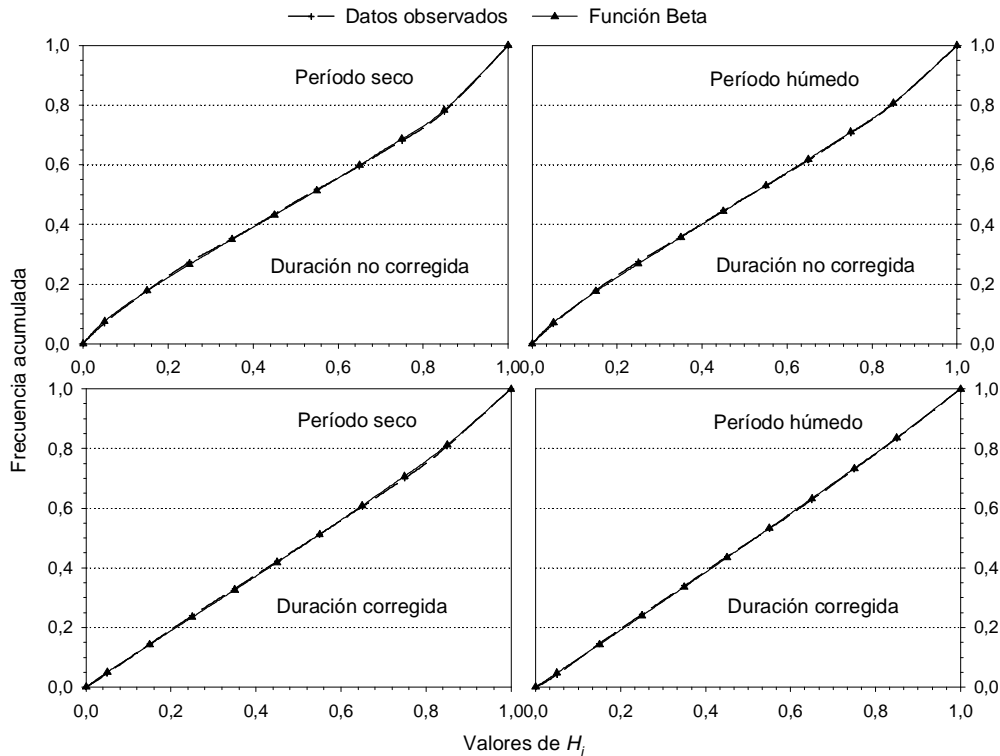


Figura 1. Ajuste de las fracciones de lluvia del yetograma adimensional acumulado a la Distribución Beta. (Lluvias de duración mayor de 3 horas. Estación de Igueldo)

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Caracterización de la distribución de la precipitación en cada lluvia

Tal y como se describe en el apartado anterior, esta distribución se caracteriza mediante un yetograma adimensional acumulado tomando como intervalo de tiempo la hora. Así, la secuencia H de fracciones de lluvia acumulada en cada intervalo horario $H(t_i)$, o lluvias adimensionales acumuladas, se describe como una muestra ordenada de tamaño n de la distribución Beta con parámetros α y β , siendo la función de densidad unidimensional de esta variable la ya expresada en la ec.(3).

A partir de la serie de datos horarios se seleccionan todas las secuencias de más de tres horas lluviosas, ya que por debajo de ese valor temporal la representación de la distribución de la lluvia queda distorsionada (García-Guzmán, 1998). Para mejorar el procedimiento de estimación, se propone aplicar el método corrector de las duraciones de las horas inicial y final de los sucesos de lluvia descrito anteriormente. Hay que recordar, que el objetivo de esta corrección es hacer

equiparables las precipitaciones recogidas en las horas extremas a las recogidas en las horas centrales y poder utilizar todas las precipitaciones horarias en la estimación de los parámetros del yetograma.

Estación de Igueldo

Se obtiene la serie correspondiente de las fracciones de lluvias $H(t_i)$, y se ajusta a la distribución Beta con parámetros α y β para los períodos seco y húmedo (Figura 1). De esta forma, se obtienen los valores de los parámetros de ajuste a la distribución Beta de los valores H del yetograma adimensional acumulado, para ambos periodos y con las duraciones corregidas y sin corregir. En todos los casos, se observa que los ajustes son muy buenos.

Estación de Fuenterrabia

Con la serie de Fuenterrabia se ha realizado el ajuste de idéntica manera, obteniéndose los resultados que se muestran en la Figura 2, muy similares a los de Igueldo. Las diferencias máximas no superan el 1% entre los valores de las series reales y las funciones ajustadas.

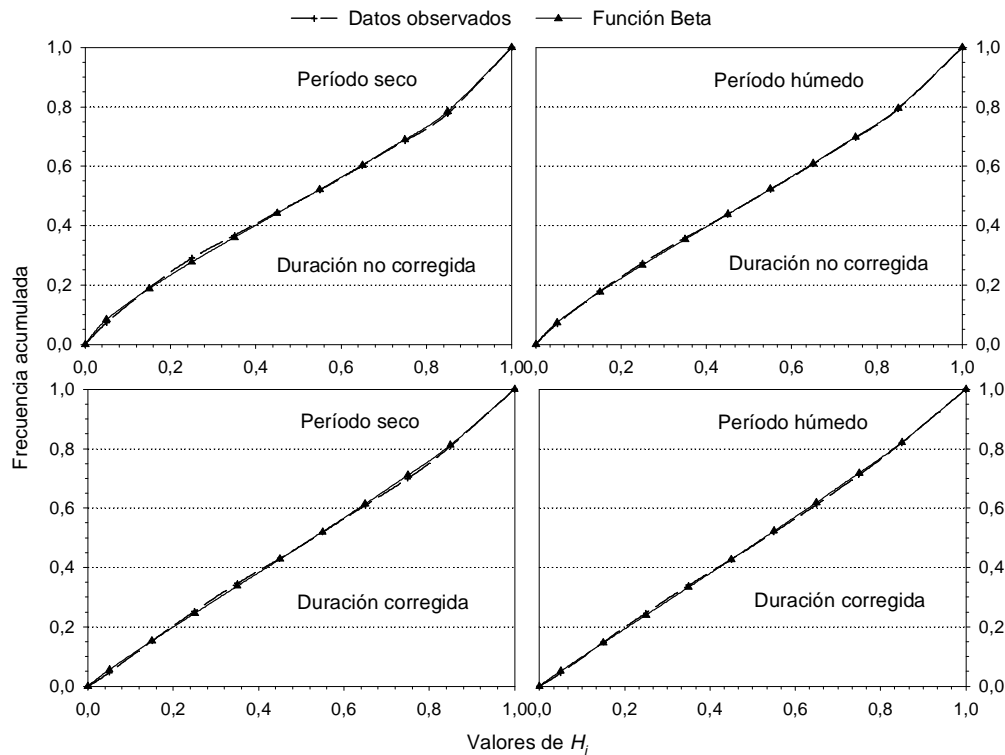


Figura 2. Ajuste de las fracciones de lluvia del yetograma adimensional acumulado a la Distribución Beta. (Lluvias de duración mayor de 3 horas. Estación de Fuenterrabia)

Por tanto, los valores H_i del yetograma adimensional acumulado de las lluvias de duración mayor de tres horas se ajustan satisfactoriamente a la distribución Beta, tanto con las duraciones corregidas como sin corregir. El método de corrección de las duraciones de las horas extremas es, por tanto, válido para esta variable.

Caracterización de la intensidad media de la precipitación en cada lluvia

Como ya se ha expuesto en el apartado anterior, la intensidad media se puede ajustar a dos distribuciones, Gamma, (ec.(4)) y Weibull (ec.(5)), utilizadas comúnmente para el ajuste de esta variable (Acreman, 1990; Zimmermann, 1998). A diferencia de las demás variables, se opta por realizar el ajuste a dos funciones, con dos métodos diferentes (momentos y máxima verosimilitud), y separando el análisis de la intensidad en función de las duraciones de las lluvias, por ser la intensidad media una variable crucial a la hora de la simulación. En general se puede aceptar que la intensidad no se comporta de la misma forma para lluvias cortas que para largas (Cepuelo y Llasat, 2004; Castro, 1997). Esta diferencia se observa claramente entre las precipitaciones de invierno (frontales, de larga duración y baja intensidad) y las de verano (convectivas, de corta duración y alta intensidad). Por todo ello

y dada la importancia de esta variable, se han analizado diferentes supuestos o hipótesis:

- Funciones de distribución (Gamma y Weibull).
- Corrección de lluvias en las horas extremas. Se han comparado los resultados entre lluvias corregidas y no corregidas.
- Duración de las lluvias, así se han comparado los ajustes sin separar las lluvias y separándolas según su duración: cortas y largas.
- Estacionalidad de la lluvia. Se han analizado dos casos: considerar un único periodo; y asumir los dos periodos (seco y húmedo) establecidos.
- Método de estimación de los parámetros: momentos y máxima verosimilitud.

De este análisis múltiple, se desprende la idoneidad de separar las lluvias de corta duración ($\leq 2h$) de las largas ($> 2h$), y utilizar el método de corrección de las horas extremas para el ajuste y simulación de la intensidad media de la lluvia. El método de máxima verosimilitud ha resultado el más adecuado para la estimación de parámetros.

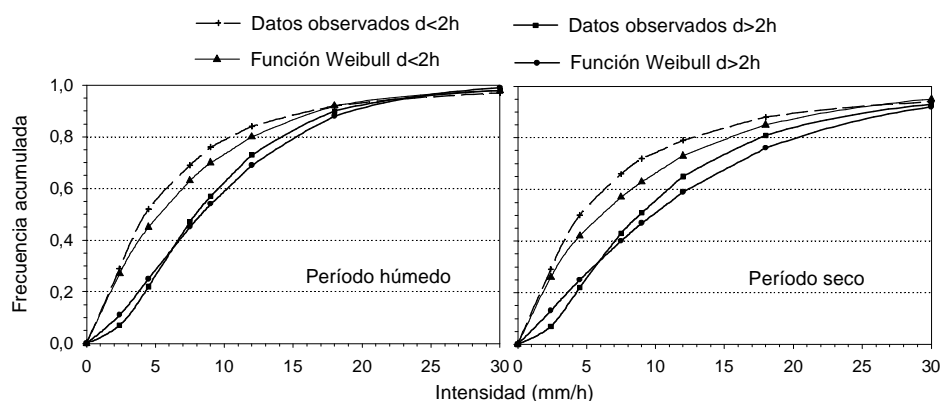


Figura 3. Ajuste de la intensidad de lluvia corregida a la Distribución Weibull, por el método de máxima verosimilitud (Igueldo)

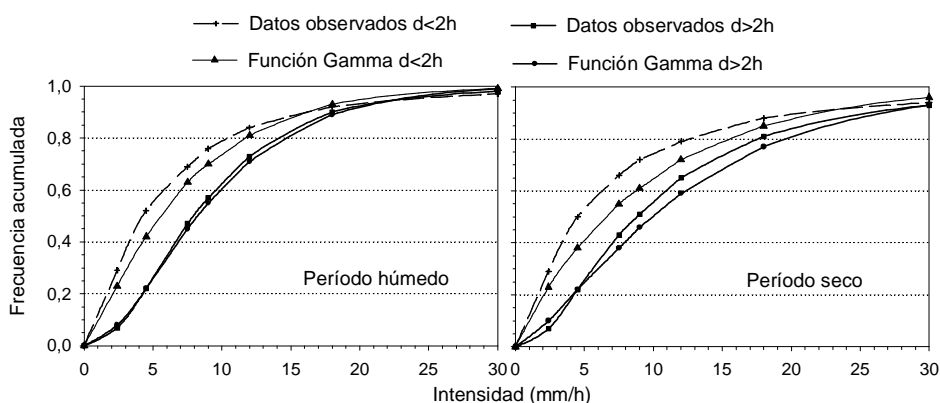


Figura 4. Ajuste de la intensidad de lluvia corregida a la Distribución Gamma, por el método de máxima verosimilitud. (Igueldo)

Estación de Igueldo

En las Figuras 3 y 4 se muestran los ajustes a las distribuciones Gamma y Weibull. En conjunto son similares, aunque algo mejor para las lluvias de corta duración en la distribución Weibull, en la que en ningún caso las diferencias llegan al 10%. Para ambas distribuciones es mejor el ajuste para las lluvias de duración mayor de 2 horas.

Estación de Fuenterrabia

Se realiza el mismo análisis que en Igueldo, comparando en primer lugar para la distribución Gamma las intensidades medias con las duraciones corregidas y sin corregir, y en segundo lugar, las intensidades medias corregidas para las distribuciones Gamma y Weibull. También se realiza el análisis de las intensidades medias de lluvia separando las lluvias según su duración.

En las Figuras 5 y 6 se muestran los ajustes a las dos distribuciones, Gamma y Weibull, por el método de máxima verosimilitud, que es

el que mejor ajuste ha presentado para Igueldo. Los resultados son mejores en Fuenterrabia que en Igueldo, con menores diferencias entre los datos observados y las funciones ajustadas, en torno al 10% en el peor de los casos. Entre ambas funciones el ajuste es muy similar, y al igual que en Igueldo, con mejor comportamiento en las lluvias mayores de 2 horas.

A la vista del análisis conjunto para ambas estaciones, parece que la distribución Weibull, separando las lluvias (corregidas) según su duración, proporciona unos ajustes más adecuados.

Caracterización de la duración de los eventos de lluvia

Como ya se ha comentado anteriormente, en general esta variable se ajusta a una función exponencial simple de parámetro λ_h , cuya función de densidad se describe en la ec.(6). Para ambas estaciones se ha realizado el ajuste tanto con los valores de las duraciones corregidas, según el método descrito, como con las duraciones sin corregir.

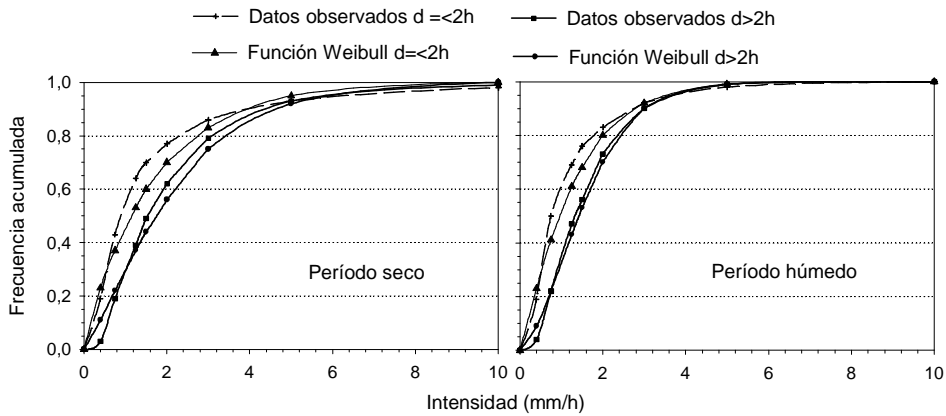


Figura 5. Ajuste de la intensidad de lluvia a la Distribución Weibull, por el método de máxima verosimilitud (Fuenterrabia)

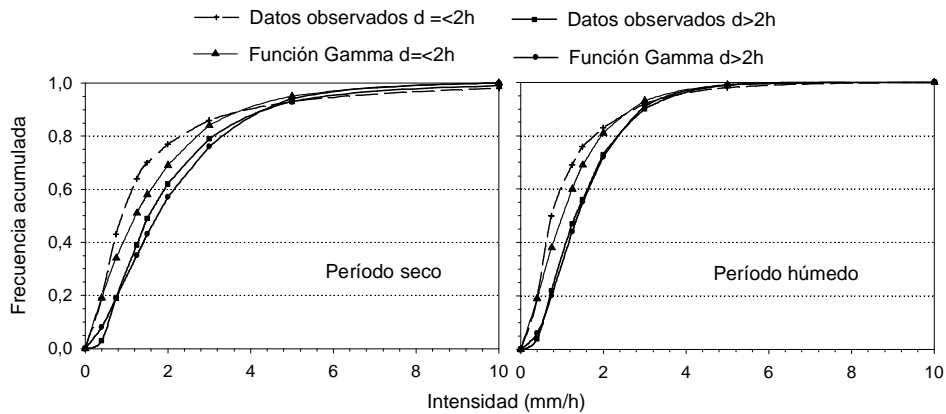


Figura 6. Ajuste de la intensidad de lluvia a la Distribución Gamma, por el método de máxima verosimilitud (Fuenterrabia)

Estación de Igueldo

En la Figura 7 se representan los ajustes a la función exponencial, y como se puede observar, el ajuste mejora claramente cuando se corrigen las lluvias.

Estación de Fuenterrabia

De la misma forma, en la Figura 8 se pueden observar los resultados de los ajustes para esta estación. En general, se observa que el ajuste con las lluvias corregidas es mejor, aunque en el ajuste del período húmedo se dan diferencias en torno a un 10%. En este caso, la mejora al corregir los datos no es tan marcada como en Igueldo (Figura 7).

Caracterización de la duración de los sucesos secos o inter-lluvias

En este caso, tal como se ha indicado anteriormente, el tiempo de duración de los períodos secos, v_s , se ha diferenciado entre sucesos secos

estables (0) e inestables (1). Por este motivo, se opta por una distribución mezcla o mixtura de exponenciales, y dependiendo que se realice la corrección o no de la duración de los sucesos, será truncada o no (ecs.(8) y (9)).

Estación de Igueldo

En la Figura 9 se muestra gráficamente el ajuste de v_s a la mixta exponencial en ambos casos. Se observa que el ajuste con las duraciones no corregidas es mejor, con diferencias que no lleguen al 10%.

Estación de Fuenterrabia

De la misma forma, en la Figura 10 se representan los ajustes en el caso de la estación de Fuenterrabia. Los resultados son a los de Igueldo, las series con lluvias no corregidas aportan ajustes mejores, aunque en el caso de las series corregidas se obtienen resultados aceptables, mejores que en Igueldo.

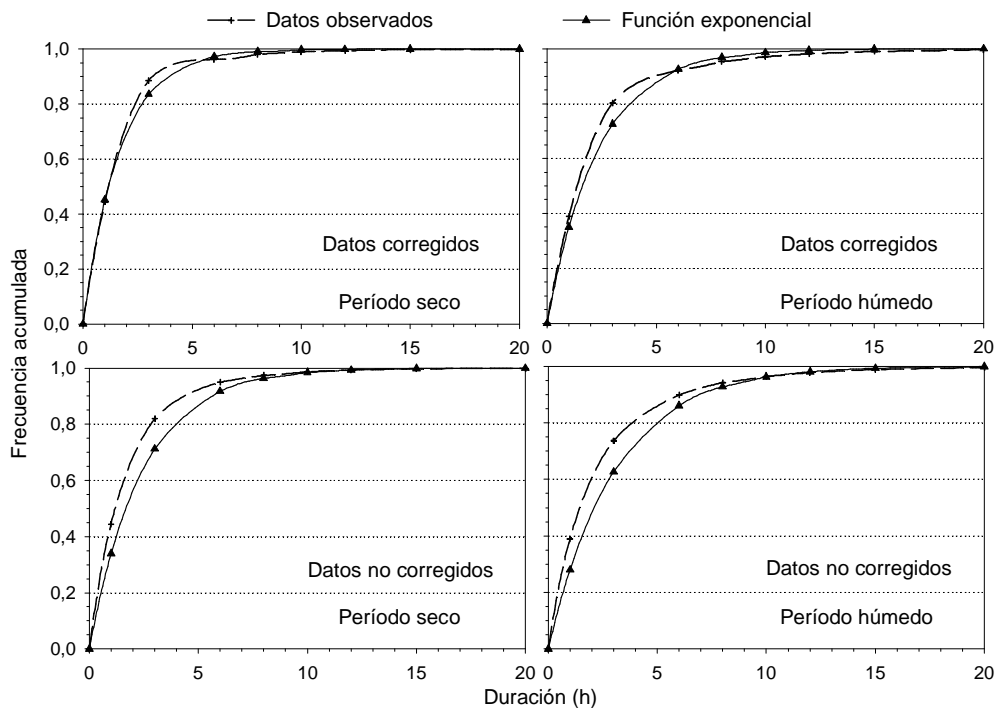


Figura 7. Ajuste de la duración de las lluvias a la Distribución Exponencial (Igueldo)

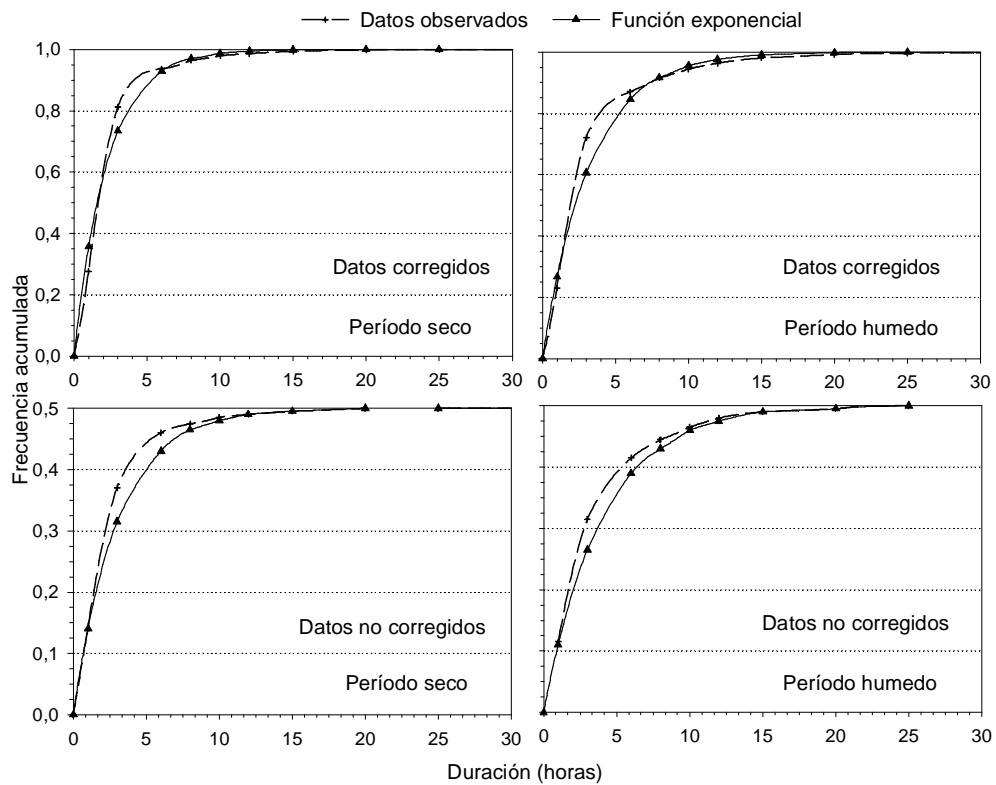


Figura 8. Ajuste de la duración de las lluvias a la Distribución Exponencial (Fuente-rabia)

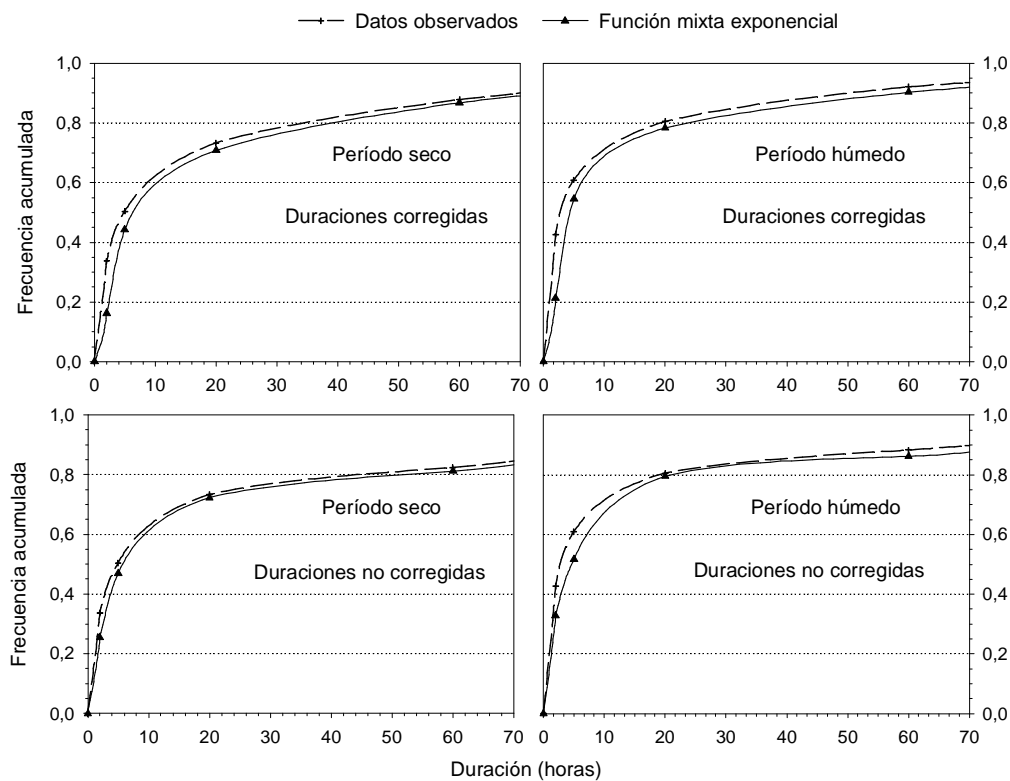


Figura 9. Ajuste de la duración de los periodos secos, v_s , a la Distribución mixta exponencial (Igueldo)

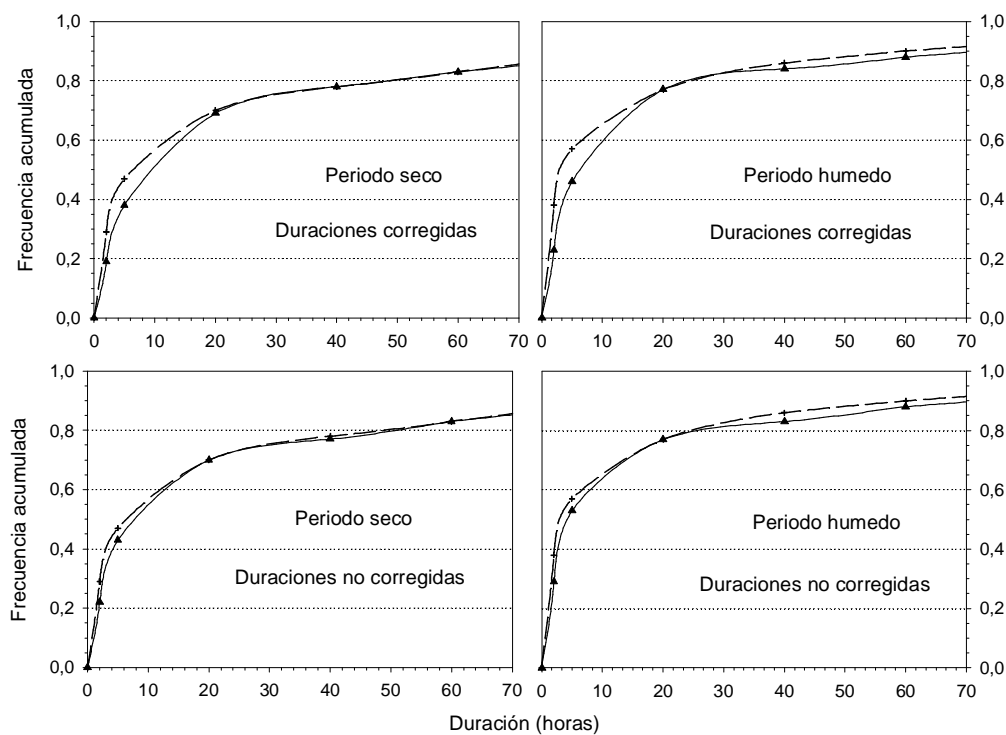


Figura 10. Ajuste de la duración de los intervalos inter-lluvia a la Distribución o (Fuenterrabía)

Variable	Distribución	Valores de los parámetros	
		Igueldo	Fuenterrabía
Yetograma Adimensional Acumulado (H_i)	Beta	$\alpha = 1,00366$	$\alpha = 0,95788$
		$\beta = 0,95587$	$\beta = 0,88850$
Intensidad media de la lluvia (i_m)	Weibull	$d \leq 2h$	$\mu = 1,02986$
		$d > 2h$	$\mu = 1,12750$
		$d \leq 2h$	$\lambda = 0,79719$
		$d > 2h$	$\lambda = 0,72566$
Duración de los sucesos de lluvia (v_h)	Exponencial	$\mu = 1,44716$	$\mu = 1,61281$
		$\lambda = 0,42895$	$\lambda = 0,39479$
Duración de los sucesos secos (v_s)	Mixta exponencial truncada	$\lambda_h = 0,42891$	$\lambda_h = 0,31064$
		$p = 0,31601$	$p = 0,28300$
		$\lambda_0 = 0,02001$	$\lambda_0 = 0,01470$
		$\lambda_1 = 0,35893$	$\lambda_1 = 0,18923$

Tabla 2. Valores de los parámetros de las funciones de distribución en el periodo húmedo (octubre-mayo)

Variable	Distribución	Valores de los parámetros	
		Igueldo	Fuenterrabía
Yetograma Adimensional Acumulado (H_i)	Beta	$\alpha = 0,95497$	$\alpha = 0,91078$
		$\beta = 0,86053$	$\beta = 0,84167$
Intensidad media de la lluvia (i_m)	Weibull	$d \leq 2h$	$\mu = 0,90537$
		$d > 2h$	$\mu = 0,96484$
		$d \leq 2h$	$\lambda = 0,69722$
		$d > 2h$	$\lambda = 0,61723$
Duración de los sucesos de lluvia (v_h)	Exponencial	$\mu = 1,15313$	$\mu = 1,22881$
		$\lambda = 0,39806$	$\lambda = 0,35467$
Duración de los sucesos secos (v_s)	Mixta exponencial truncada	$\lambda_h = 0,58475$	$\lambda_h = 0,44186$
		$p = 0,42006$	$p = 0,36322$
		$\lambda_0 = 0,01955$	$\lambda_0 = 0,01270$
		$\lambda_1 = 0,30928$	$\lambda_1 = 0,16218$

Tabla 3. Valores de los parámetros de las funciones de distribución en el periodo seco (junio-septiembre)

Resumen de los valores de los parámetros de las funciones de distribución seleccionadas

En las Tablas 2 y 3 se presentan los valores de los parámetros de las funciones de distribución finalmente seleccionadas y en los supuestos elegidos, entre ellos con las duraciones de los intervalos de lluvia corregidos.

Del análisis de los valores de estas Tablas 2 y 3 se deduce:

- que la proporción de tiempos secos estables (p) sigue un patrón similar en las dos estaciones. En ambas estaciones es inferior 50% (< 2 en el período húmedo el período seco), lo que parece lógico al tener el periodo húmedo más frentes atlánticos

con más lluvias asociadas y más intervalos cortos entre lluvias. En el periodo seco, sin embargo, se mezclan las situaciones frontales y convectivas, es menor, por tanto, la proporción $(1 - p)$ de sucesos de lluvias e intervalos inter-lluvias asociados en cada frente, lo que

- que no puede decirse que las duraciones de los períodos secos, tanto inestables (inverso de λ_1) como estables (inverso de λ_2) sean muy diferentes en el periodo seco y en el húmedo. Esto indica la persistencia de las situaciones frontales en el periodo seco y su difícil diferenciación con las típicas situaciones convectivas de verano.

- La duración de las lluvias (inverso de λ_2) es mayor en el periodo seco que en el húmedo en ambas estaciones, lo que es razonable si se admite la menor duración de las lluvias convectivas frente a las frontales.

CONCLUSIONES

La discriminación de los datos de las series en dos períodos en base a un análisis descriptivo y numérico ha resultado satisfactoria. En el primer período, de octubre a mayo, denominado húmedo, predominan las lluvias asociadas a situaciones frontales, y en el segundo, de junio a septiembre, llamado seco, predominan las lluvias convectivas asociadas a bajas frías.

Puede aceptarse como válida la caracterización en el caso horario para las cuatro variables descritas. La distribución de la cantidad de precipitación, dentro de cada acontecimiento de lluvia, mediante el yetograma adimensional acumulado, se ajusta a la función de distribución Beta. La intensidad media horaria de la lluvia a la función de distribución Weibull. La duración de las lluvias a la función exponencial, y las duraciones de los períodos secos entre lluvias a la función mixta exponencial truncada. Se ha aplicado en todos los casos para la obtención de los mismos el método de máxima verosimilitud, ya que se comporta mejor que el método de los momentos.

Se ha mostrado como adecuada la corrección de las duraciones de las horas extremas de las lluvias, por lo que se han utilizado las duraciones corregidas para todos los ajustes, aunque las diferencias no son muy grandes con los ajustes obtenidos sin corregirlas.

La eliminación de los datos correspondientes a las lluvias más cortas no conduce en prácticamente ningún caso a la mejora de los ajustes, por lo que se ha desechado, salvo en el caso del yetograma adimensional acumulado.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento al Centro Meteorológico Territorial del País Vasco, que gracias a un Convenio suscrito entre Universidad Pública de Navarra y Instituto Nacional de Meteorología, nos han facilitado los datos de las series de precipitación objeto de estudio. Así mismo queremos agradecer a Patxi Tamés y a Andoni Da Silva de la Diputación Foral de Guipúzcoa la aportación de información facilitada.

REFERENCIAS

- Acreman, M.C., (1990). A simple stochastic model of Hourly Rainfall for Farnborough, England. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 35, 119–148.
- Arnold, J.G. y J.R. Williams, (1989). Stochastic generation of internal storm structure at a point. *Transactions of ASAE*, 32(1), 161–167.
- Castro, A., (1997). Influencia de la evolución temporal de la lluvia en el diseño hidrológico. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, Córdoba.
- Castro, A., A. García y J.V. Giráldez, (2005). Modelo de lluvia en tiempo continuo. VI Simposio del Agua en Andalucía, tomo I, 215–225. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas, Instituto Geológico y Minero.
- Ceperuelo, M. y M.C. Llasat, (2004). La precipitación convectiva en las cuencas internas de Cataluña. *Revista del Aficionado a la Meteorología*, 23.
- García, A. y E. Aranda, (1993). A stochastic model of dimensionless hyetograph. *Water Resour. Res.*, 29, 2363–2370.
- García, A., (1998). Modelos hidrológicos. Córdoba, Universidad de Córdoba.
- Huff, F.A., (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resour. Res.*, 3, 1007–1019.
- Hutchinson, M.F., (1990). A point rainfall model based on a 3-state continuous Markov occurrence process. *J. Hydrol.*, 114, 125–148.
- Martínez, A. y J.D. Salas, (2004). Modelación estocástica de lluvias horarias. *Ingeniería del Agua*, 11(1), 29–39.
- Palazón, J. y A. Garcia-Guzman, (2004). Modelado de series climatológicas mediante una red neuronal artificial. *Ingeniería del Agua*, 11(1), 41–52.
- Pejenaute, J.M., (1990). Tipos de tiempo y clima de las comarcas navarras. Gobierno de Navarra, Pamplona.
- Puente, C.E. y Obregón, N., (1996). A deterministic representation of temporal rainfall: Results for a storm in Boston. *Water Resour. Res.*, 32, 2825–2839.

Rodríguez-Iturbe, I., B. Feibes de Power, M.B. Sharifi y K.P. Georgakakos, (1989). Chaos in Rainfall. *Water Resour. Res.*, 25, 1667–1675.

Todorovic, P. y D.A. Woolhiser, (1975). A stochastic model of n-day precipitation. *J.*

Appl. Meteorology, 14, 17–24.

Zimmermann, E.D., (1998). Synthetic storm generation in a flatland region, Santa Fe, Argentina. *Journal of Environmental Hydrology*, 6(2), 10pp., Texas, USA.