



La modelación matemática de la peligrosidad de inundación en el siglo XXI

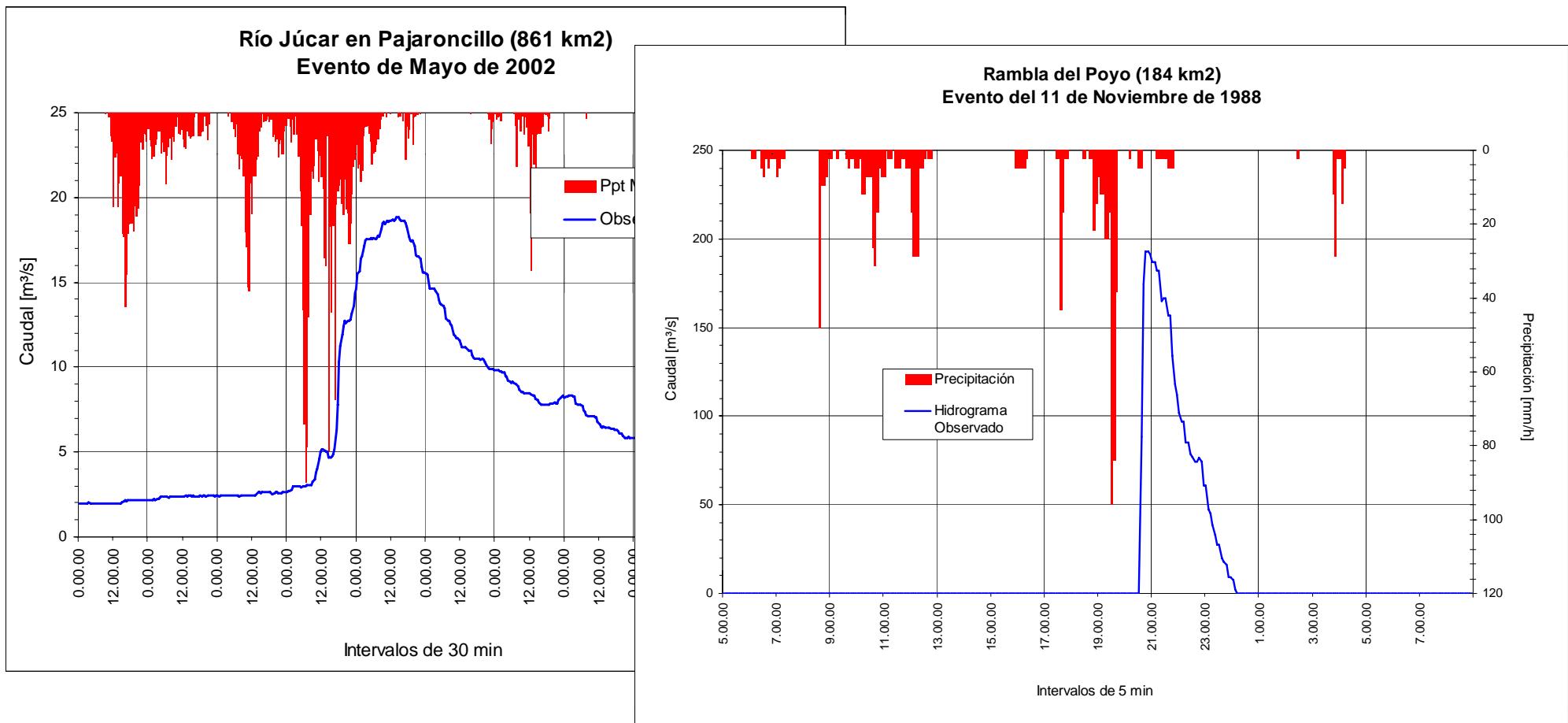
Prof. F. Francés

Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental
Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente
Universitat Politècnica de València

- Introducción
 - Peligrosidad y riesgo
 - El paradigma de la Avenida de Proyecto
- Análisis de frecuencia de crecidas con información adicional
 - Información no sistemática (histórica y de paleocrecidas)
 - Avenida Máxima Probable (PMF)
- Modelos estadísticos no-estacionarios
- Estudio de las comarcas de las Marinas
 - Estimación cuantiles mediante generación de tormentas sintéticas
 - Modelación hidrológica distribuida
- Inundaciones costeras: modelo mixto estadístico
- Estimación de la incertidumbre
- Conclusión

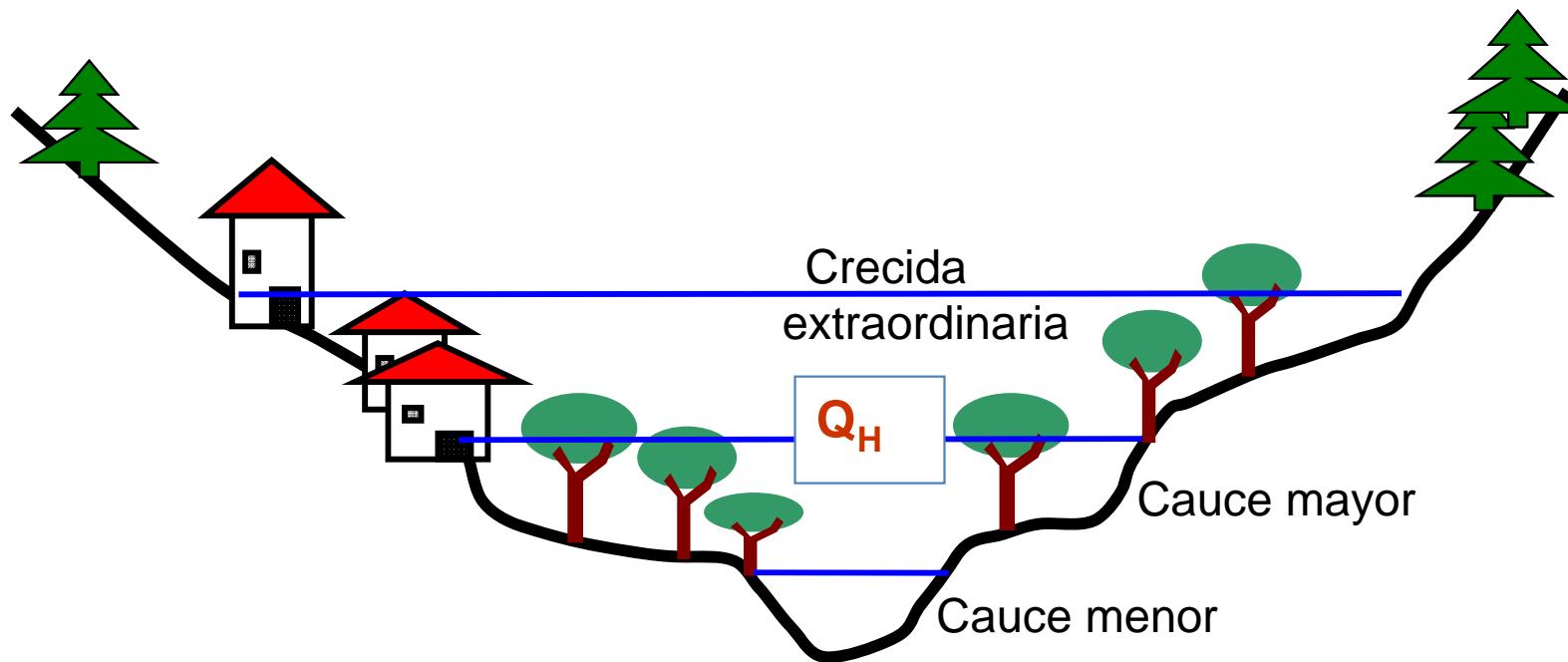
Introducción

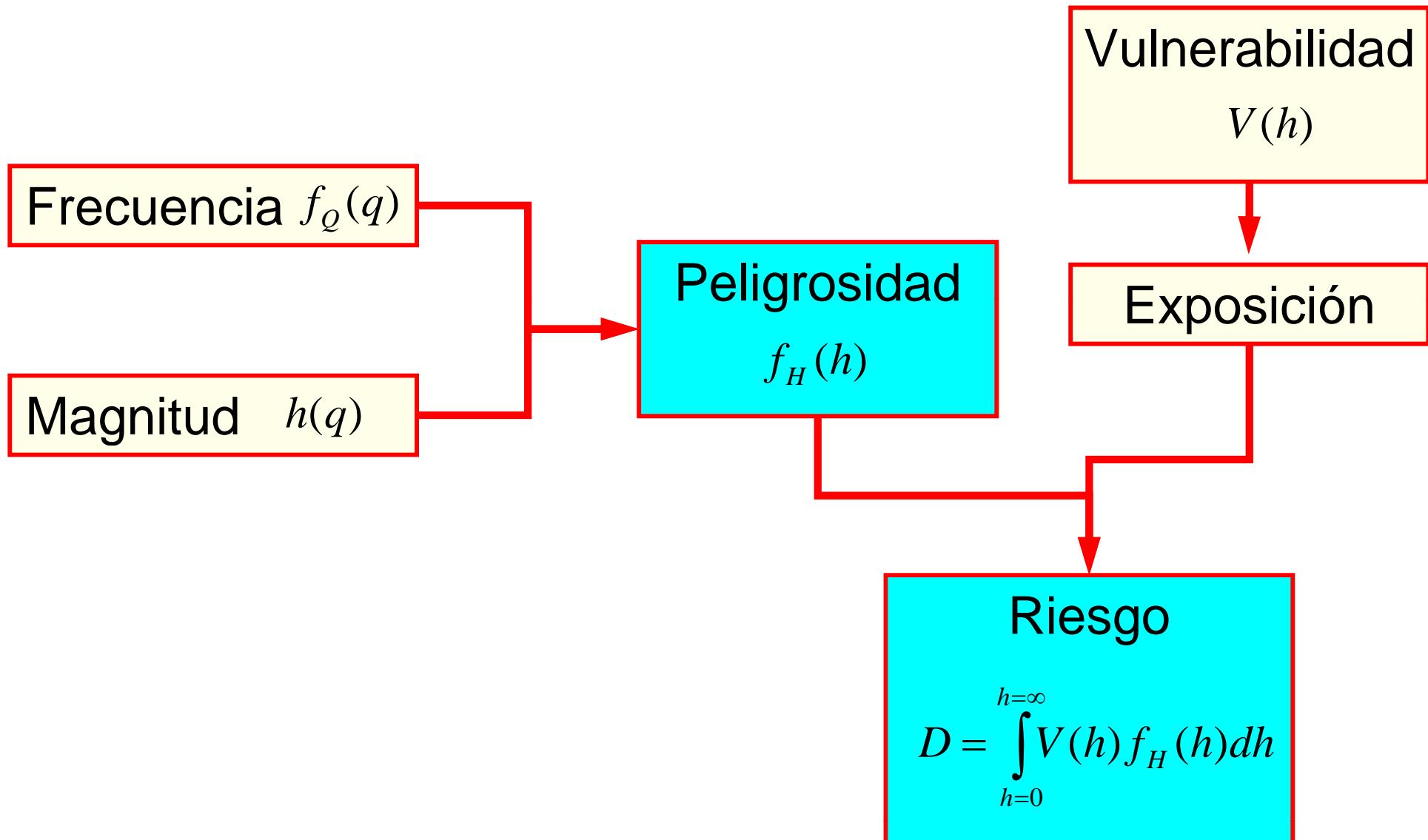
- Son episodios de escorrentía superficial => necesidad de una precipitación mínima



- No todas las crecidas originan inundaciones => Se necesita definir un umbral de inundación

Q_H ~ máxima capacidad de desagüe Zona de Inundación





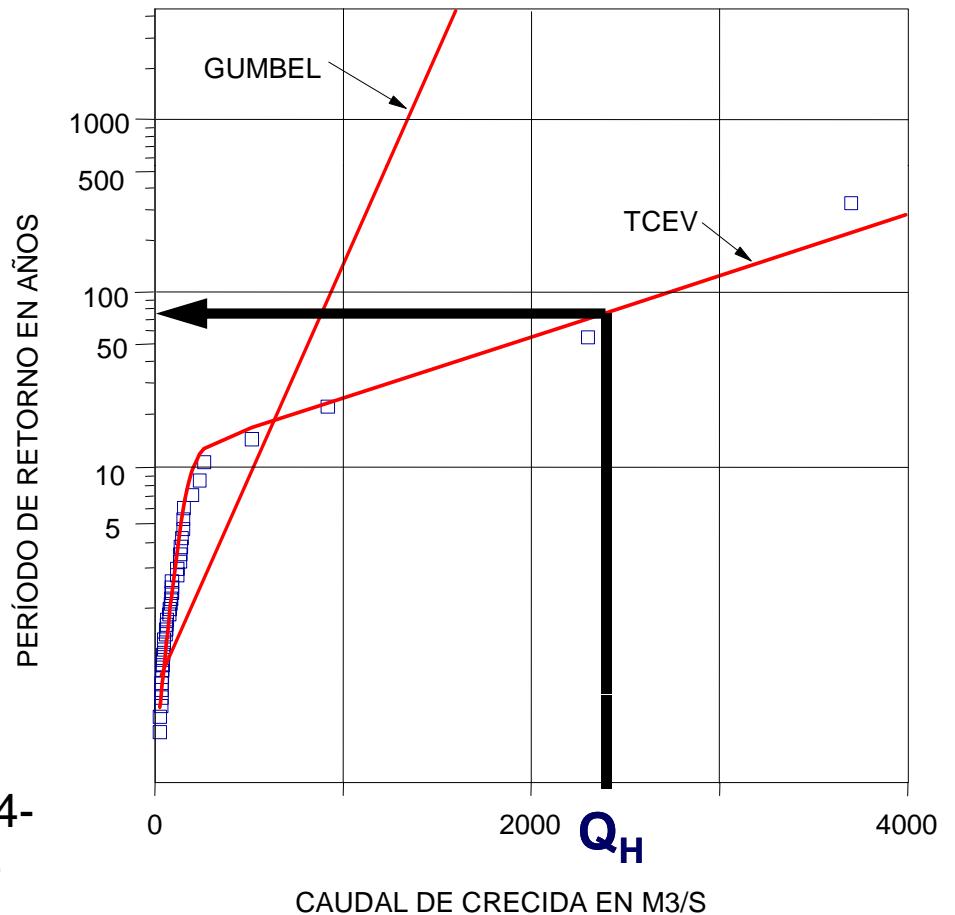
Frecuencia de las inundaciones

- Inundación si $q > Q_H \Rightarrow$ Frecuencia de inundaciones:

$$p = P [Q > Q_H] = 1 - F_Q(Q_H)$$

- Con estación de aforos:

Río Turia en Manises (1944-45 a 1988-89 con 41 años)



- El paradigma de la “Avenida de Proyecto” se basa en el concepto de “Tormenta de Diseño”

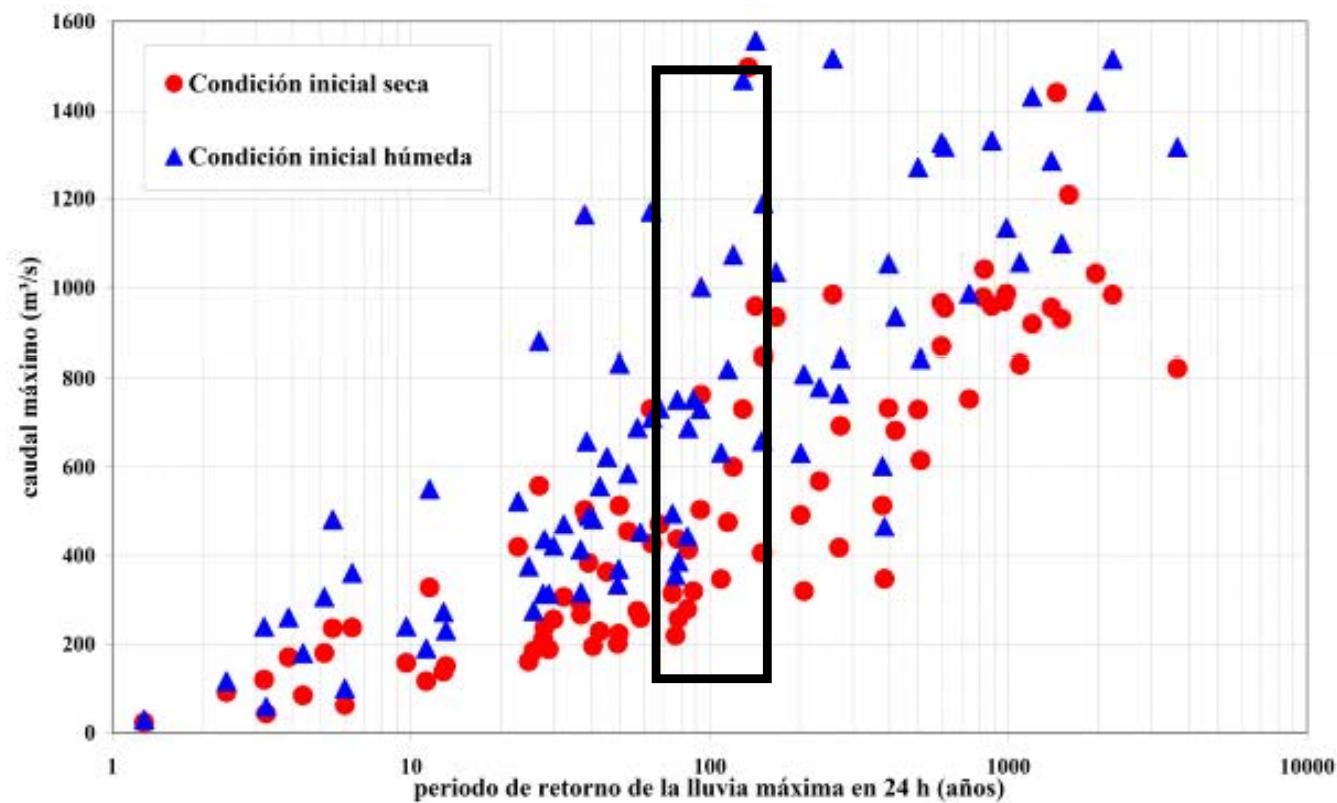
Análisis estadístico de Pd => Tormenta de diseño de T => Simulación

- Ventaja “pírrica”: Una sola simulación (enfoque clásico)
- Inconvenientes específicos:
 - Distribución temporal y espacial de la precipitación
 - Estado inicial único
 - **¿ Q_T lo genera Pd_T ?**

La avenida de proyecto

- ¿Una única tormenta uniforme en el espacio y simple en el tiempo + un estado inicial dará el resultado correcto?

NO!



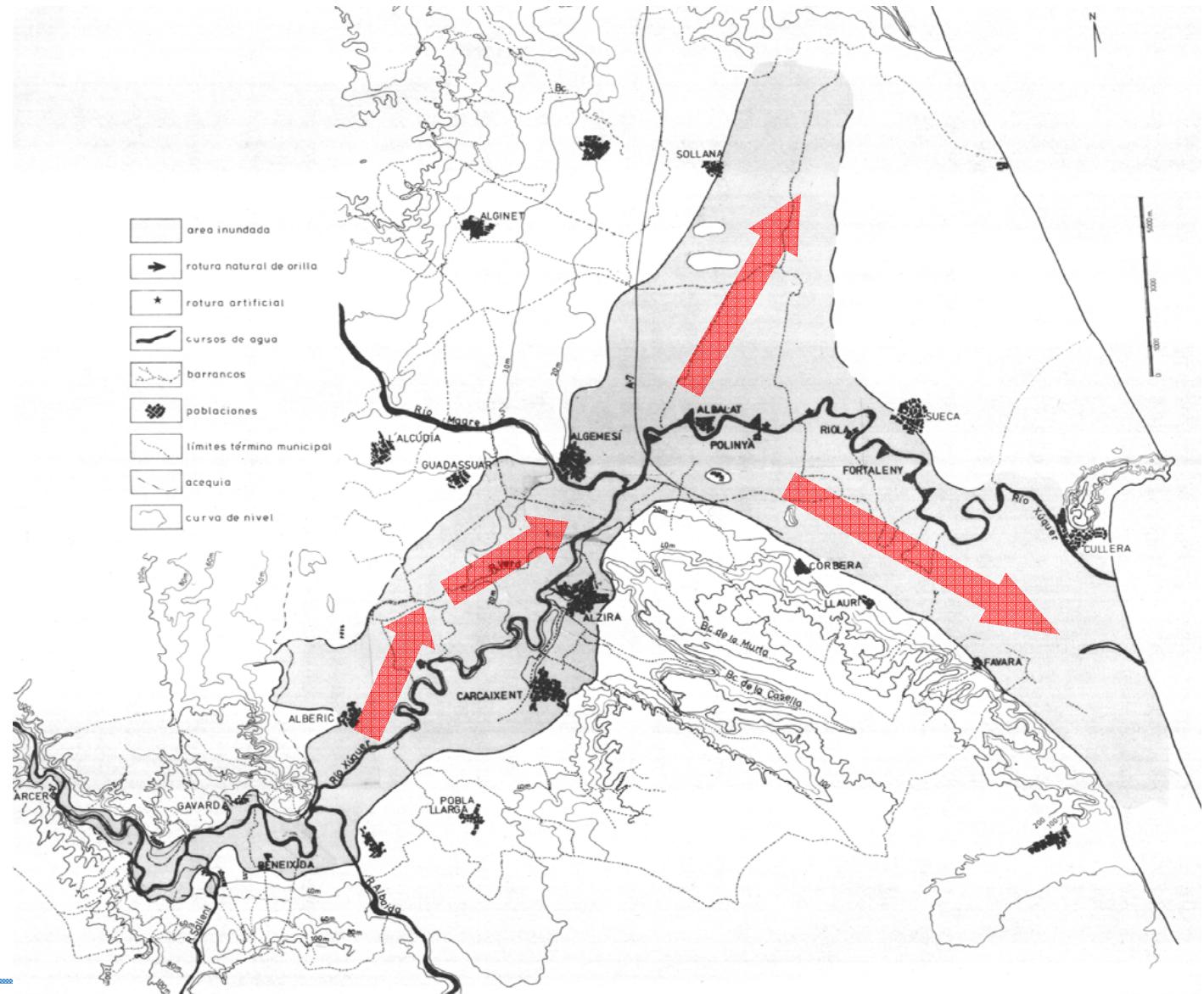
Distribución empírica de Qmax en R.Poyo en A7 situación actual con la probabilidad de la tormenta sintética

Magnitud de las inundaciones

- Magnitud en un punto = conjunto de factores que afectan al daño producido:
 - Calado del agua
 - Duración
 - Velocidad
 - Cantidad de sedimentos

Llano aluvial convexo

Área inundada por el
río Xúquer en 1987
(Carmona y
Segura, 1989)



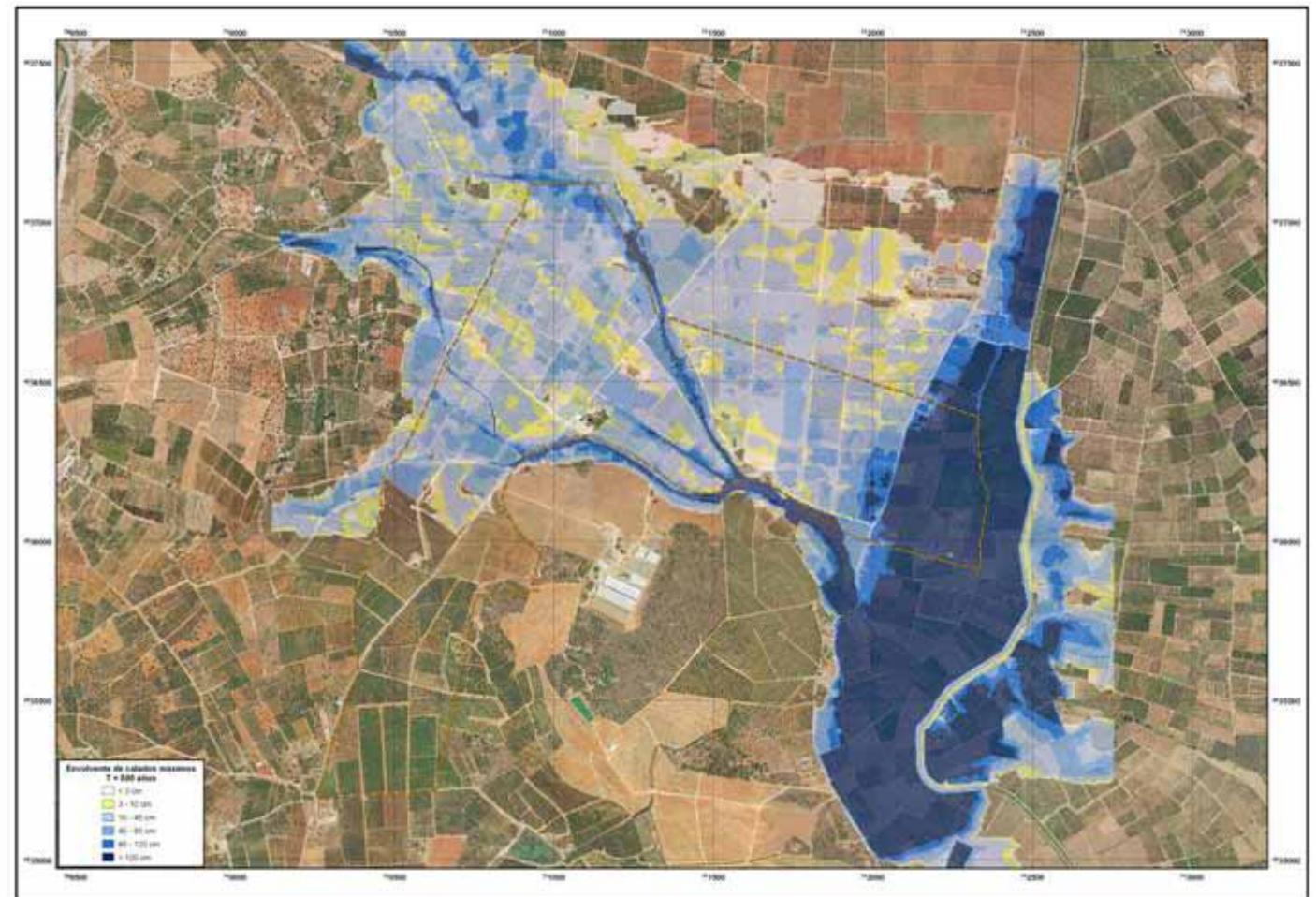
La modelación matemática de la peligrosidad de inundación en el siglo XXI

Magnitud de las inundaciones

- Magnitud en un punto = conjunto de factores que afectan al daño producido:
 - Calado del agua
 - Duración
 - Velocidad
 - Cantidad de sedimentos
- Estudio Hidráulico: conversión de caudal en magnitud:
 - Modelos hidráulicos flujo transitorio 2D
 - Topografía de detalle: Lidar

Mapa de peligrosidad

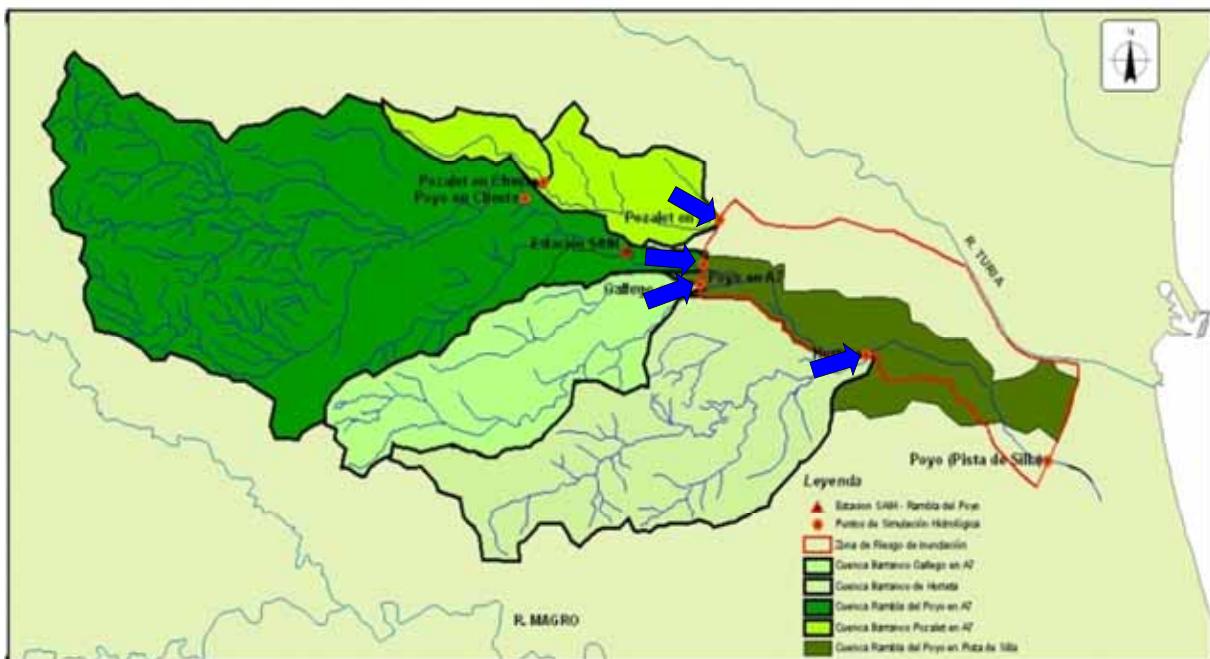
- Escala zona inundación: Un mapa de magnitudes para cada T



Calados para $T=500$ años
en la Garrofera (IIAMA-
Hidrogaia, 2008)

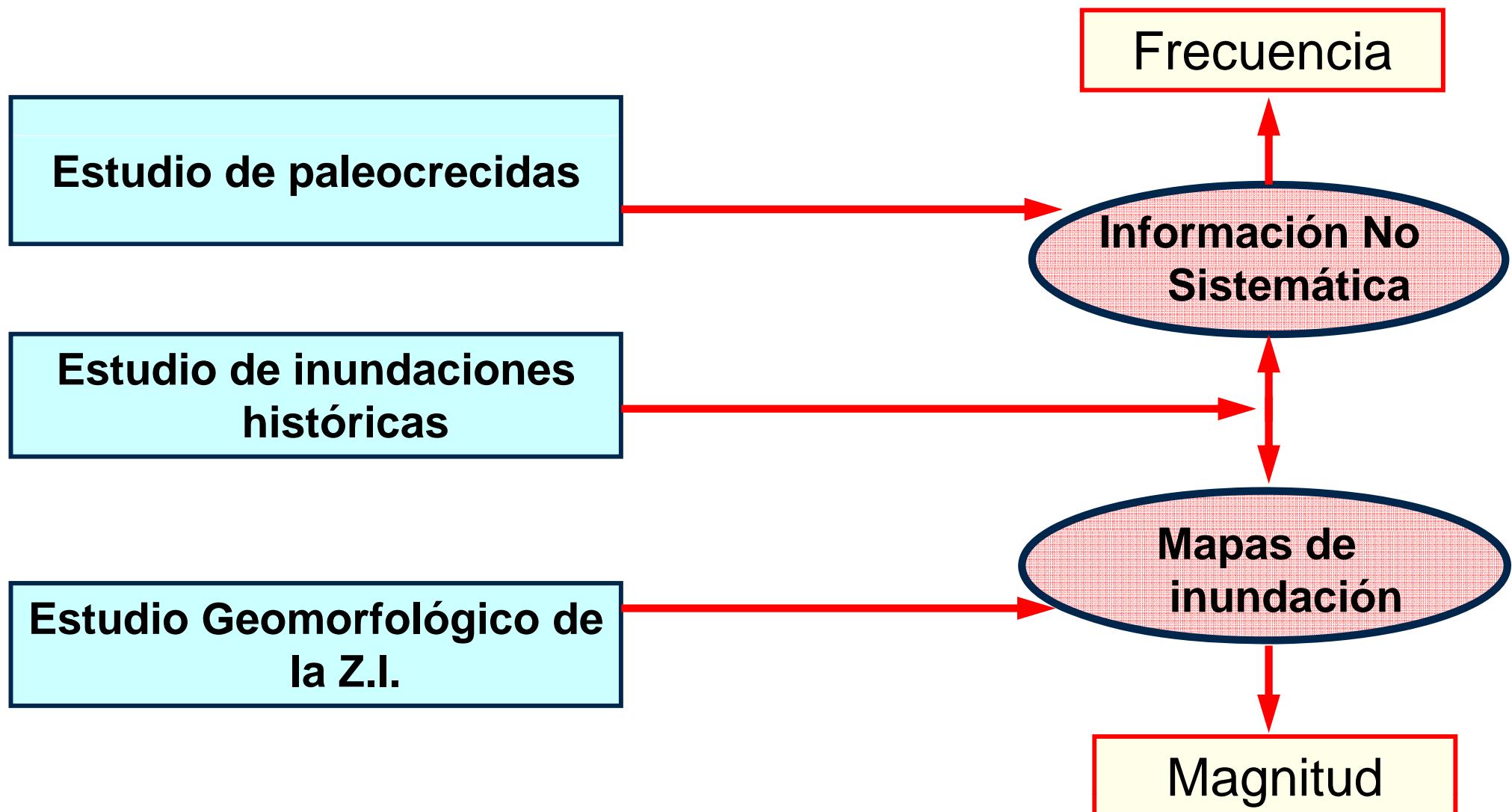
Separación de modelos

- Zona de Inundación: Tratamiento puramente hidráulico
 - El modelo hidrológico proporciona el o los hidrogramas de entrada a la zona de inundación

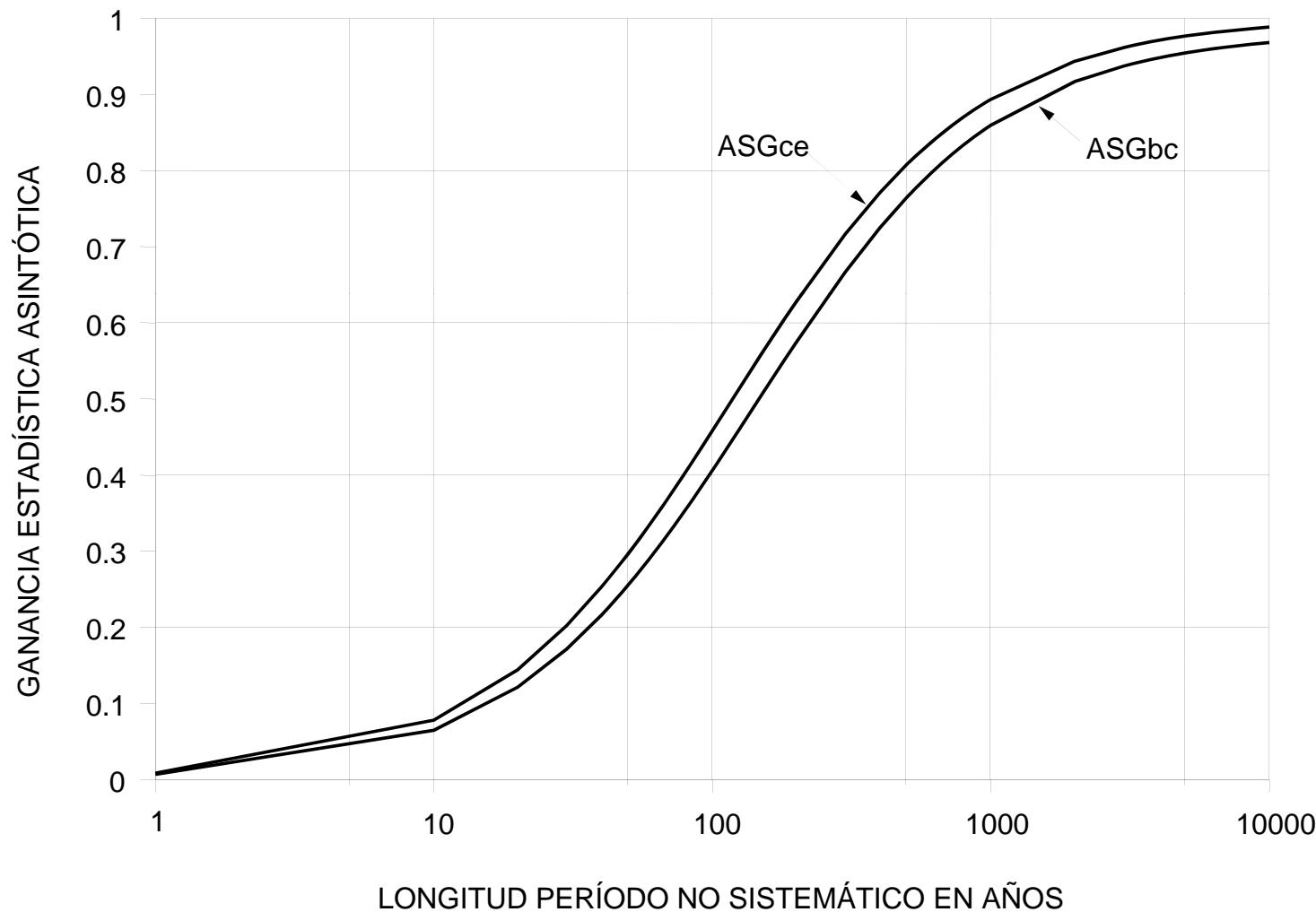


- Entradas a la ZI de R. Poyo:
- Bco. del Pozalete
 - Rambla del Poyo
 - Bco. Gallego
 - Bco. Horteta
 - Lluvia neta sobre la ZI

Reducir la incertidumbre

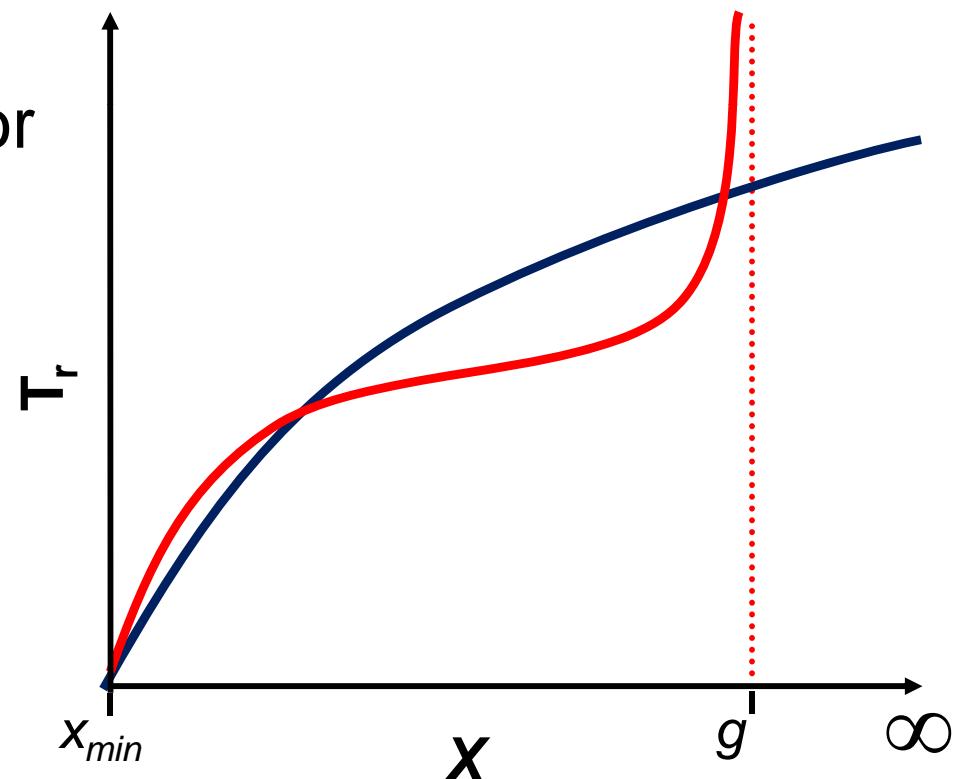


Análisis estadístico de crecidas con información adicional



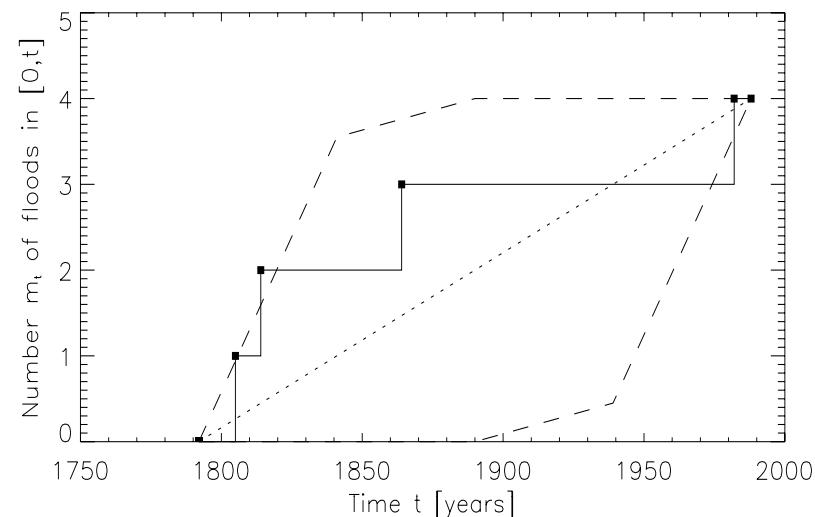
TCEV
 $N = 100$
 $H = 50$
 $T = 100$

- La PMF es la mayor crecida físicamente posible en una cuenca específica (Smith and Ward, 1998)
 - Tiene un significado físico basado en la PMP, y proporciona un límite superior
 - Su existencia cambia el comportamiento de la cdf para T medios y altos:

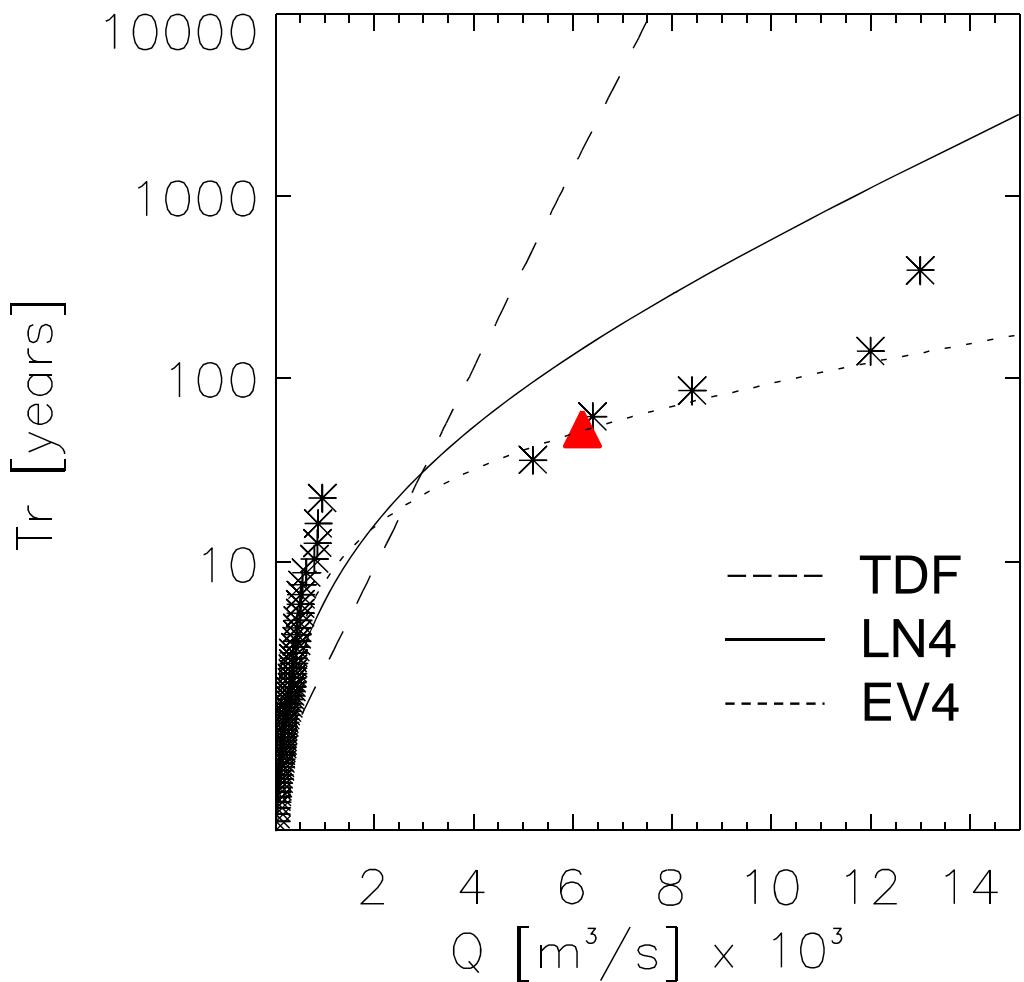


- Estudio CEDEX (1983) con reconstrucción **inundaciones históricas** en Carcaixent
 - Límite de inundación $X_H = 6,200 \text{ m}^3/\text{s}$
 - Período histórico: 1792 a 1945
- Comprobación de la estacionariedad mediante el test de Lang (Lang et al., 1999)

Año	Caudal Punta (m^3/s)
1632	Superior a 6.200
1778	6.200
1805	8.400
1814	6.400
1864	13.000
1923	4.800



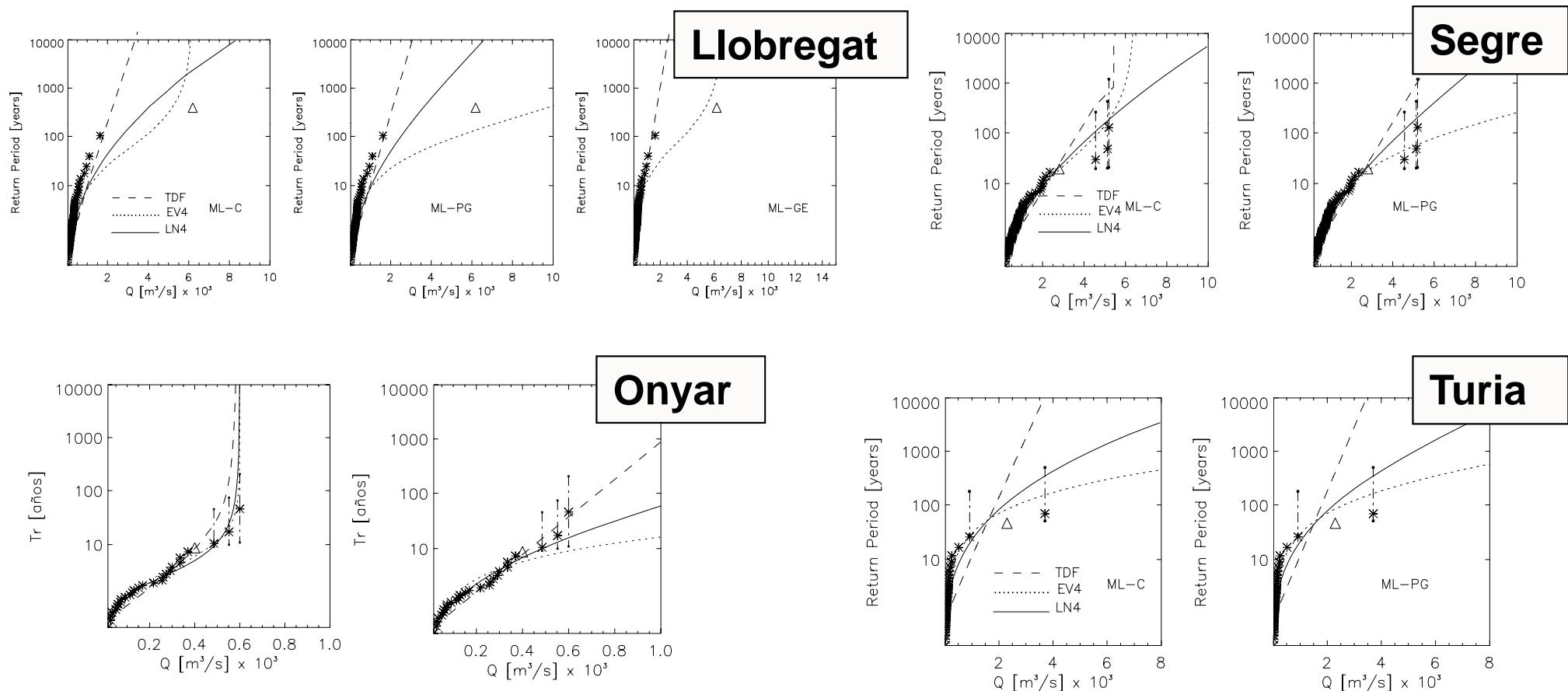
Estimación prefijando g



- PMF (utilizando caudal específico en Tous) $\sim 33,900 \text{ m}^3/\text{s}$
- Efecto “pata de perro” por dos poblaciones
- Diferente aproximación al límite:
 - Más lenta TDF
 - Más rápida EV4

Comparación de modelos

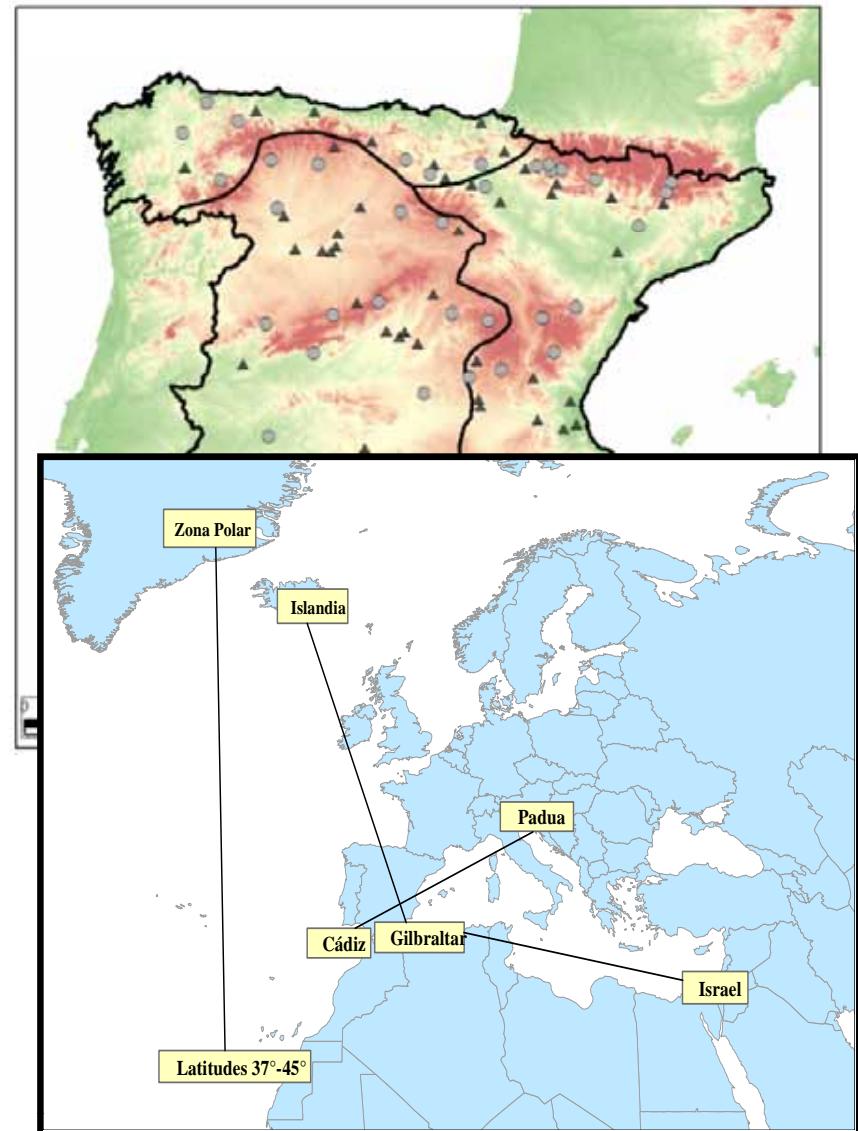
- EV4 funciona mejor en cuenca mediterránea, por existir coeficientes de asimetría elevados (Takara and Tosa, 1999)



Modelos no estacionarios

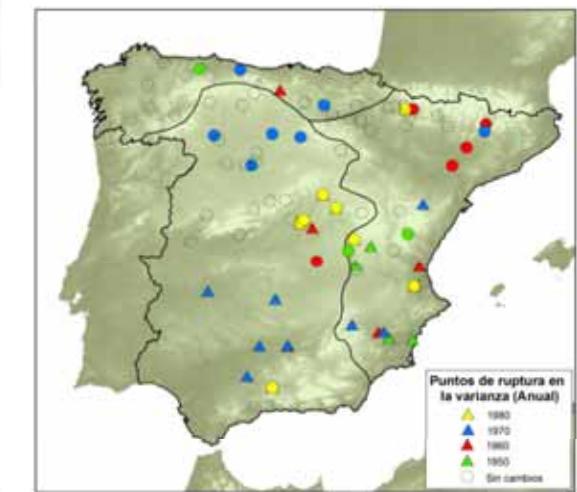
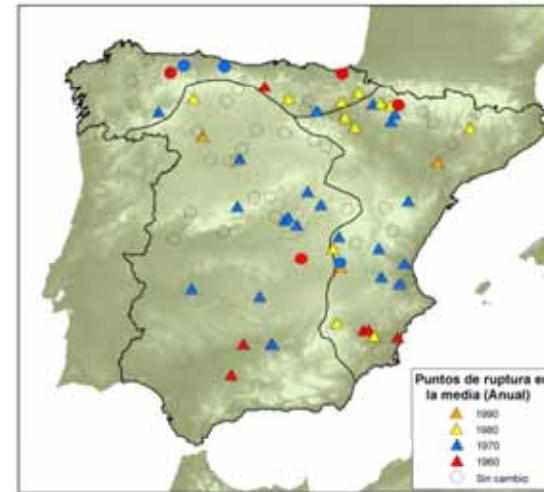
Caso de estudio

- 80 estaciones de caudales
- 4 índices macroclimáticos
 - Oscilación del Atlántico Norte (**NAO**)
 - Oscilación del Ártico (**AO**)
 - Oscilación del Mediterráneo Occidental (**WeMO**)
 - Oscilación del Mediterráneo (**MO**)
- + Fenómeno del Niño como placebo



Evidencia de no estacionaridad

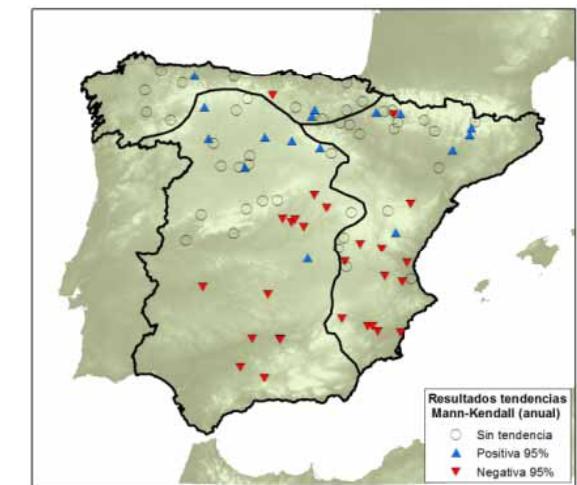
- Puntos de ruptura
(Test de Pettitt)



- Tendencias temporales
(Tests de Mann-Kendall,
Pearson y Spearman)



En la media



En la varianza



□ Cambios en el clima

NAO



AO



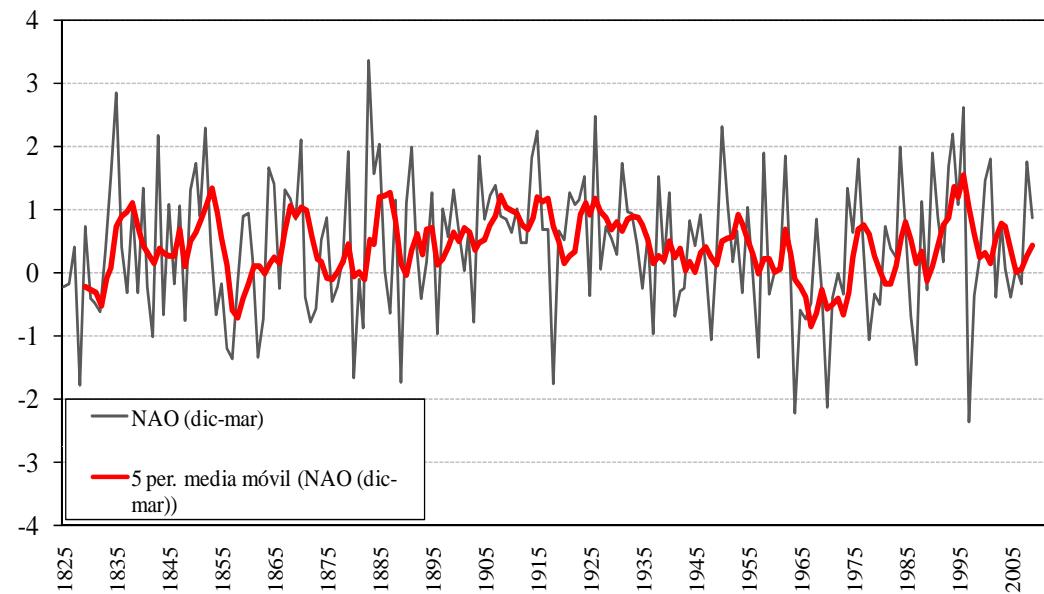
MO



WeMO

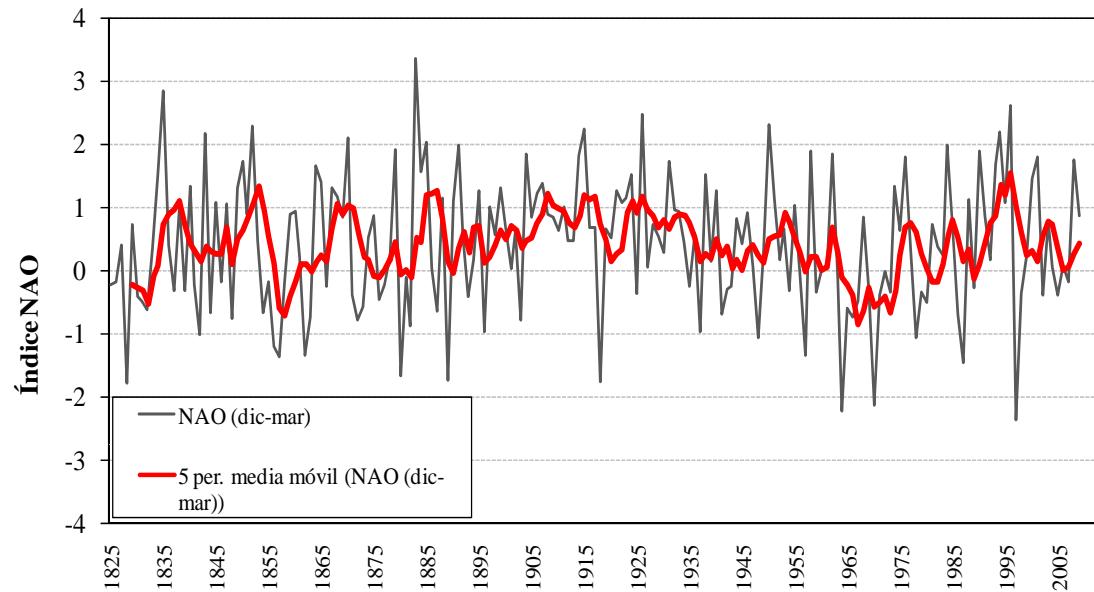


Índice NAO

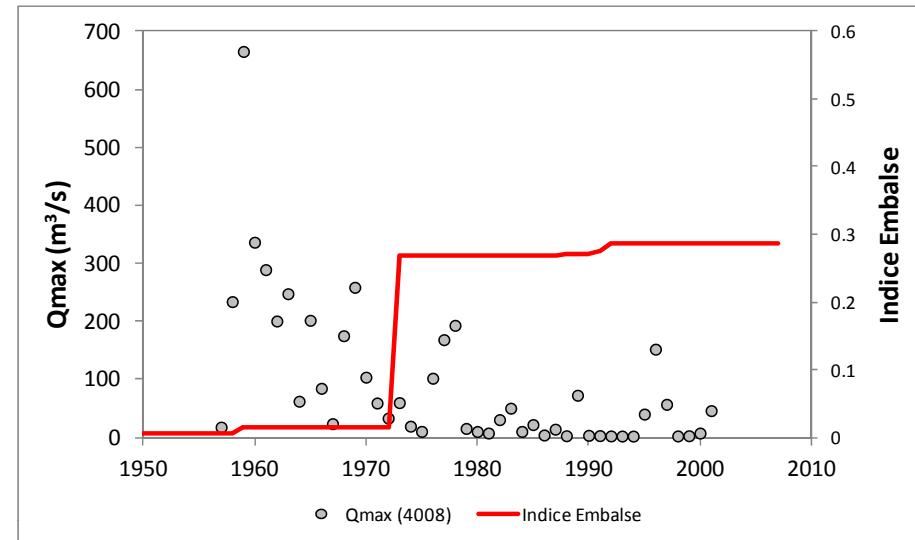


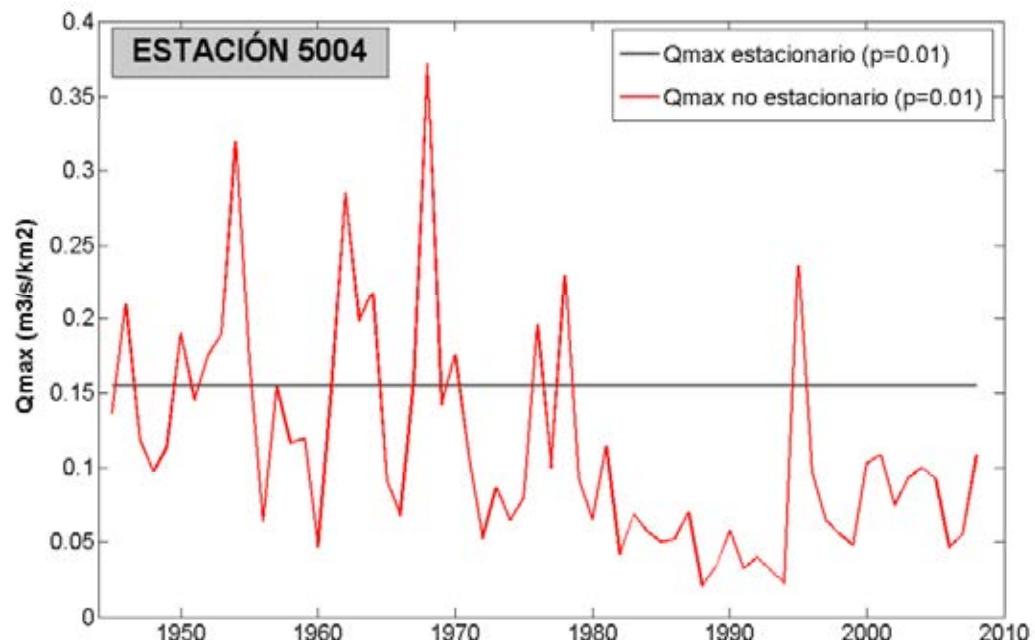
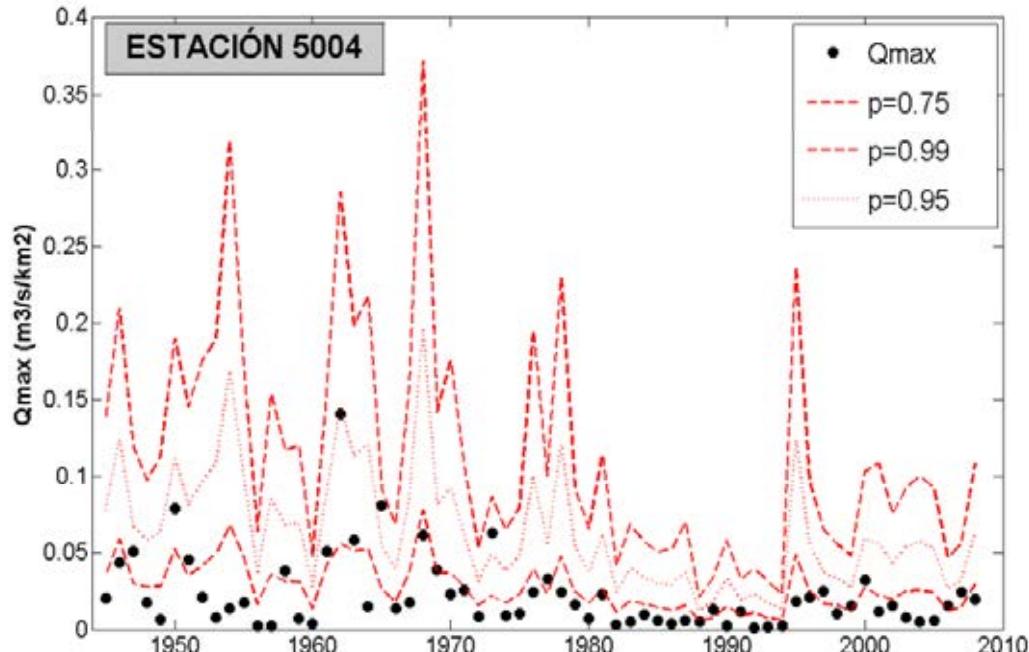
- Corr. sign. (fase negativa)
- Corr. débil (fase negativa)
- Corr. sign. (fase positiva)
- Corr. débil (fase positiva)
- Correlación nula

□ Cambios en el clima



□ Construcción de embalses

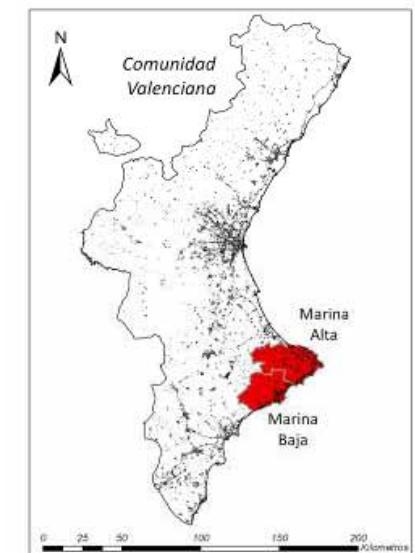




Lognormal: $\theta_1 \sim \text{NAO}_w + \text{AO}_w + \text{cs(IE)}$;
 $\theta_2 \sim \text{NAO}_i - 1$

Estudio de las comarcas de las Marinas

- Dentro del Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de las comarcas de la Marina Alta y de la Marina Baja:
 - Estimación frecuencia de las Pd máximas anuales
 - Construcción de un modelo estocástico de tormentas y generación sintética de un número elevado de eventos
 - Implementación de un modelo hidrológico distribuido
 - Análisis del estado de humedad inicial del suelo a escala diaria
 - Asignación de probabilidad final mediante un modelo estadístico multivariado **en más de 200 puntos**

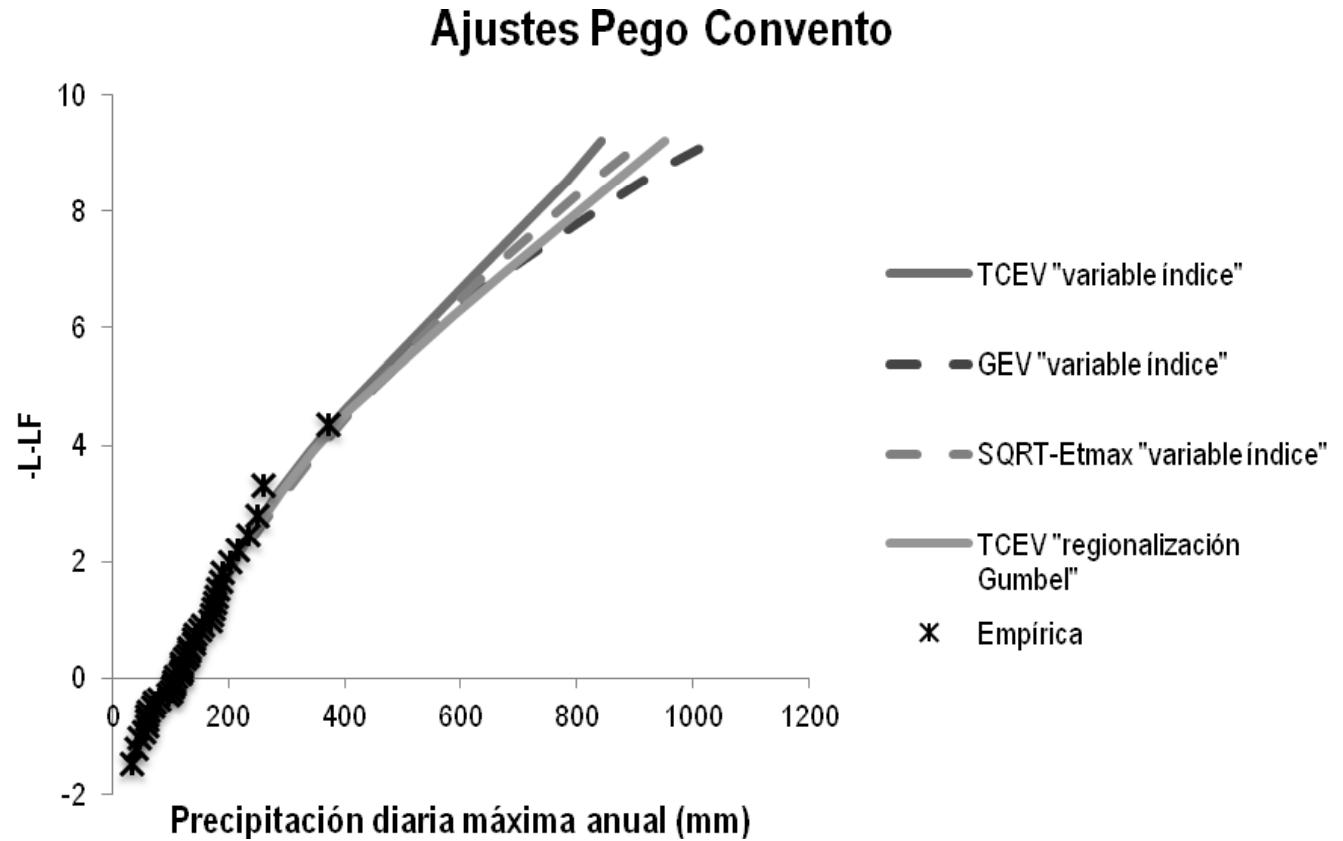
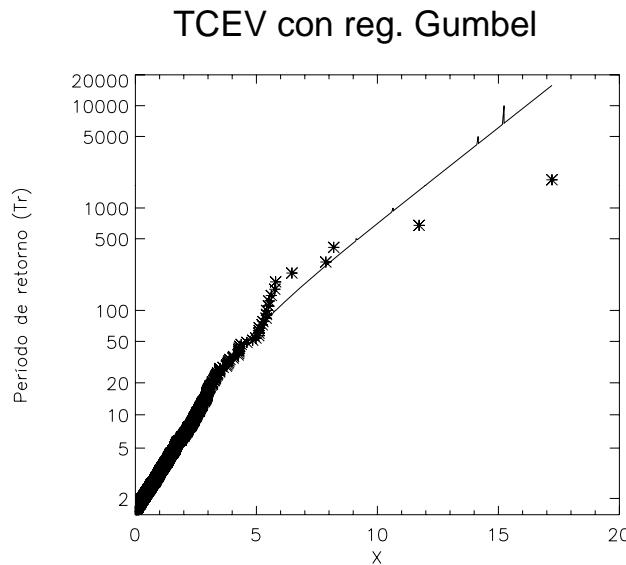


Estudio de la Pd máxima anual

- Análisis regional con 45 estaciones AEMET y SAIH => 1054 años equivalentes
- Comprobación homogeneidad mediante test de Fisher sobre el coeficiente de variación
- Modelos:
 - Regionalización por variable índice + diversas cdfs (incluyendo con límite superior)
 - Regionalización Gumbel y ajuste TCEV

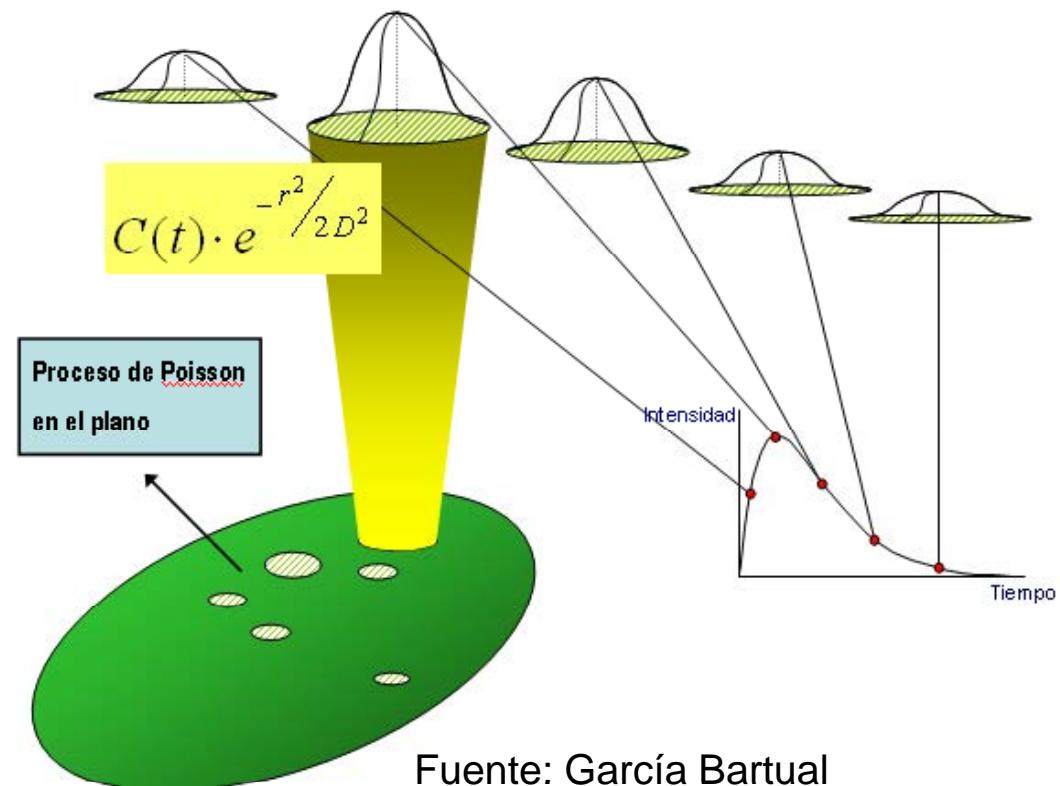
Estudio de la Pd máxima anual

□ Resultados:



Modelo de tormenta: RAINGEN

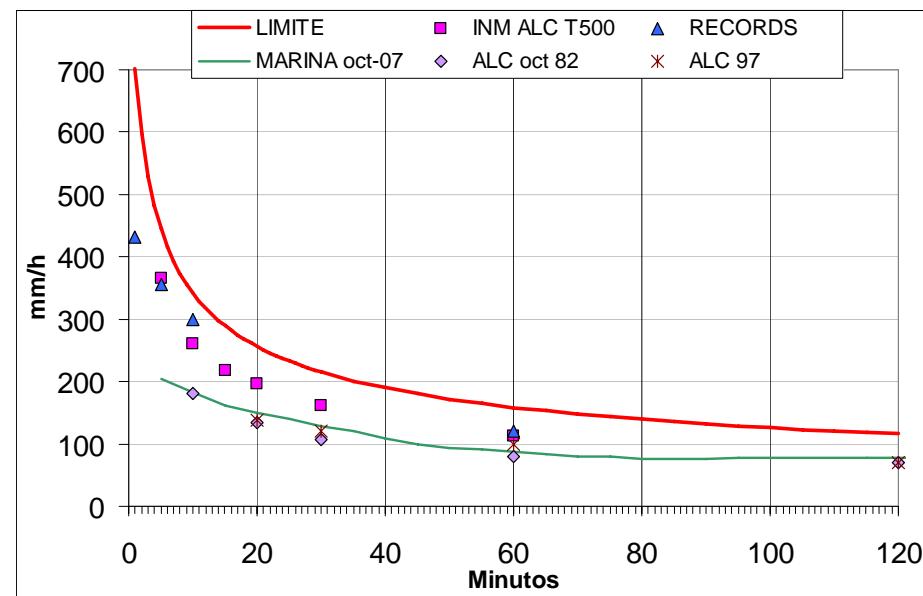
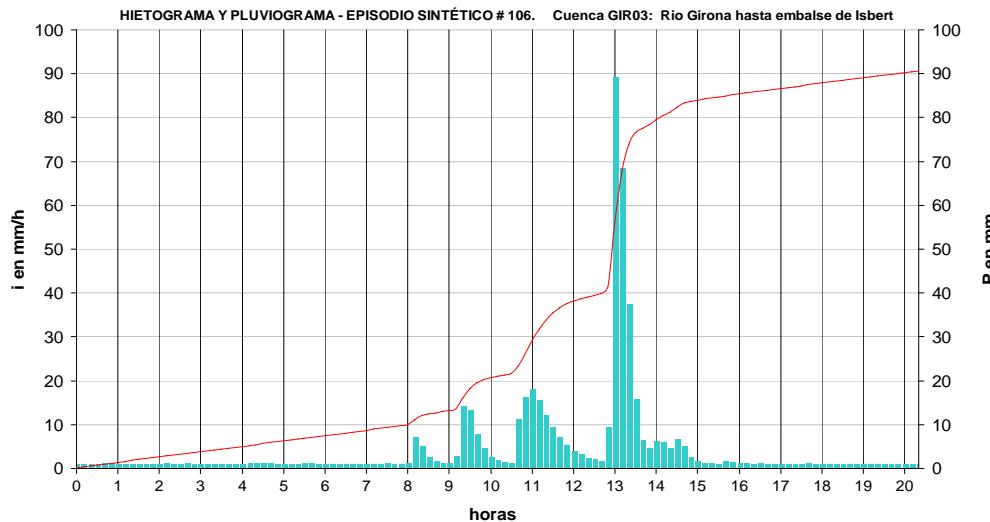
- Las tormentas son una superposición de “celdas”, cuya intensidad se determina según procesos estocásticos en el espacio y en el tiempo
- Modelo de Rodriguez-Iturbe e Eagleson (1987) pero mejorado por Salsón y García Bartual (2003)



Fuente: García Bartual

Generación de tormentas sintéticas

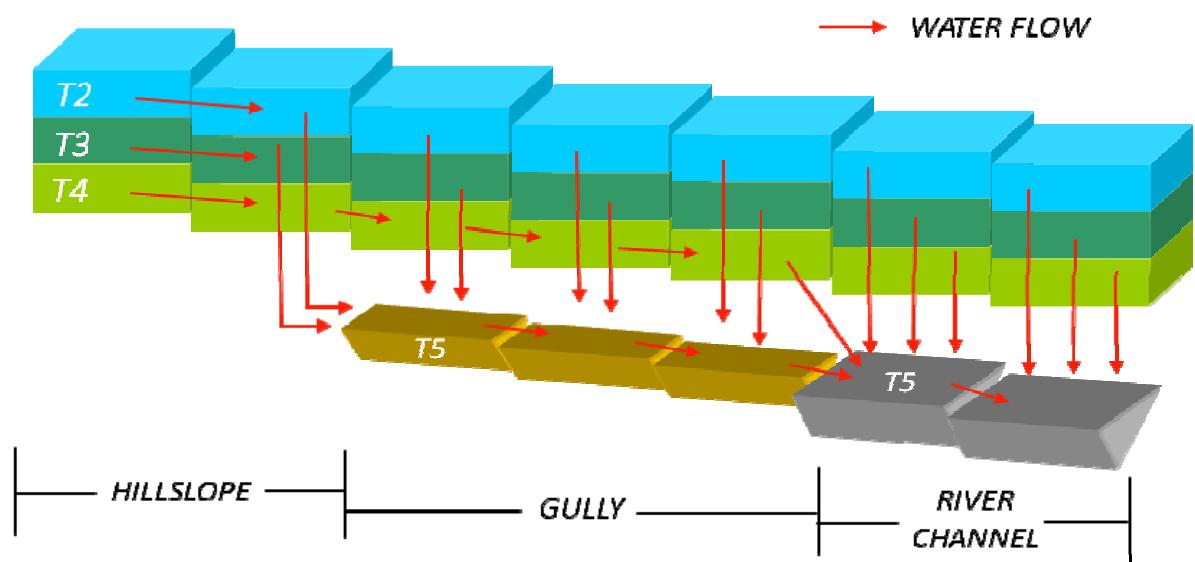
- Se generaron unas 500 tormentas sintéticas en una cuadrícula de 60x65 km con discretización de 1km y 10 min



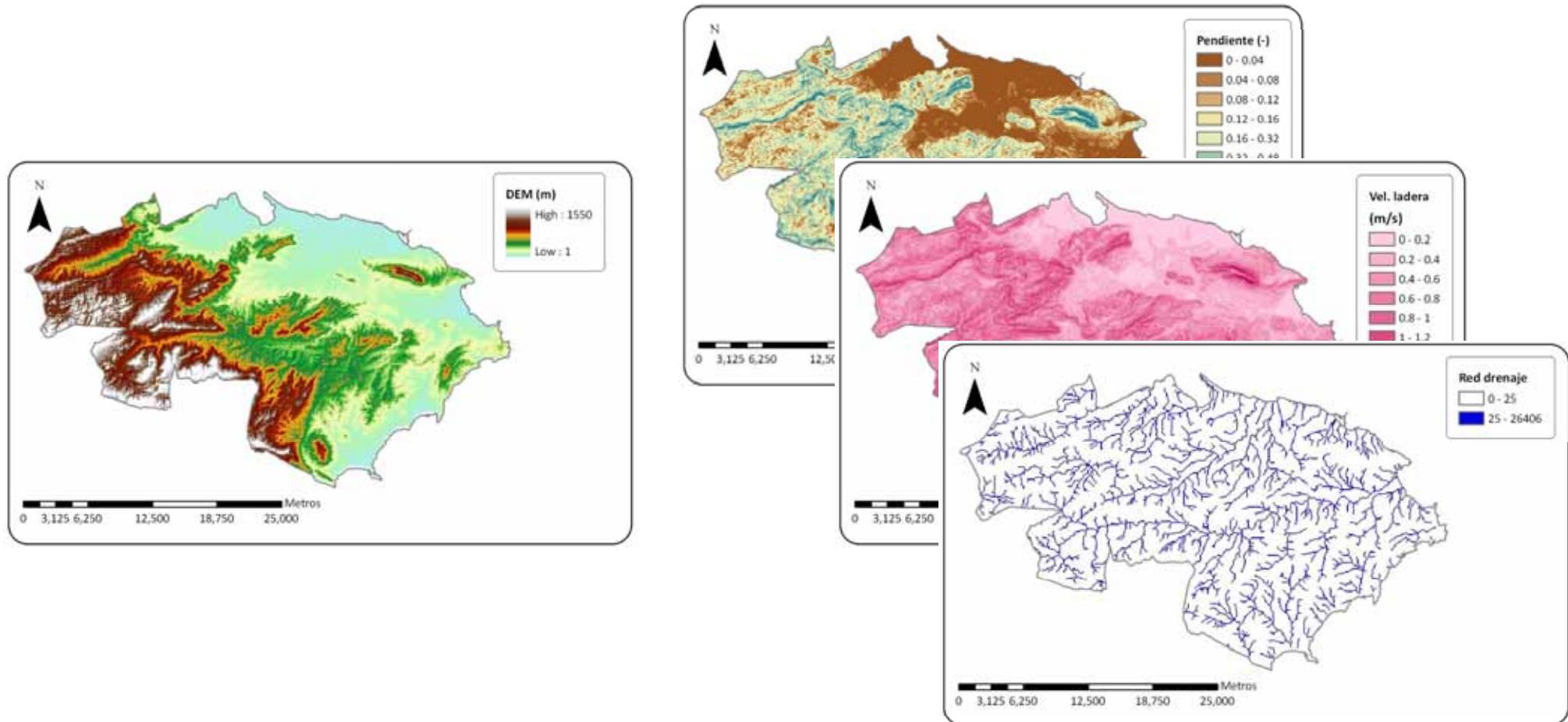
... y se seleccionaron 368

Modelo hidrológico: TETIS v8.1

- Desarrollado por la UPV desde 1994 (v 7.3 en la web)
- Distribuido en el espacio:
 - => Reproducción variab. espacial del Ciclo Hidrológico
 - => Reducción del efecto de escala espacial
 - => Explotación de toda la información existente

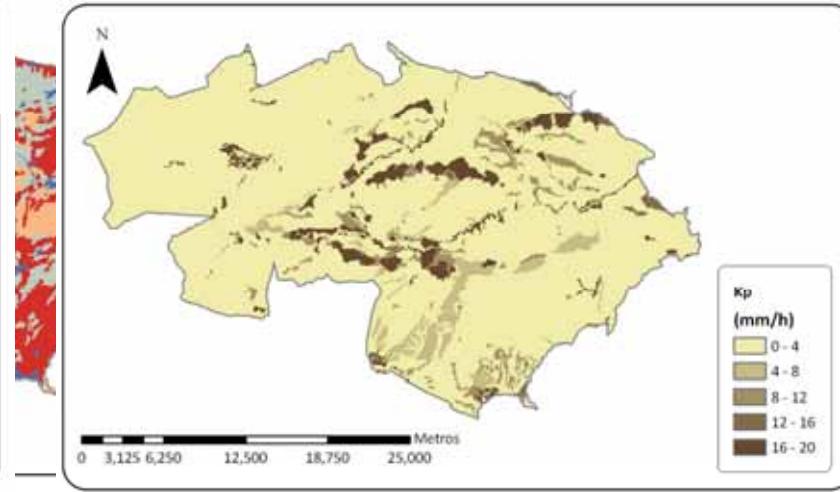
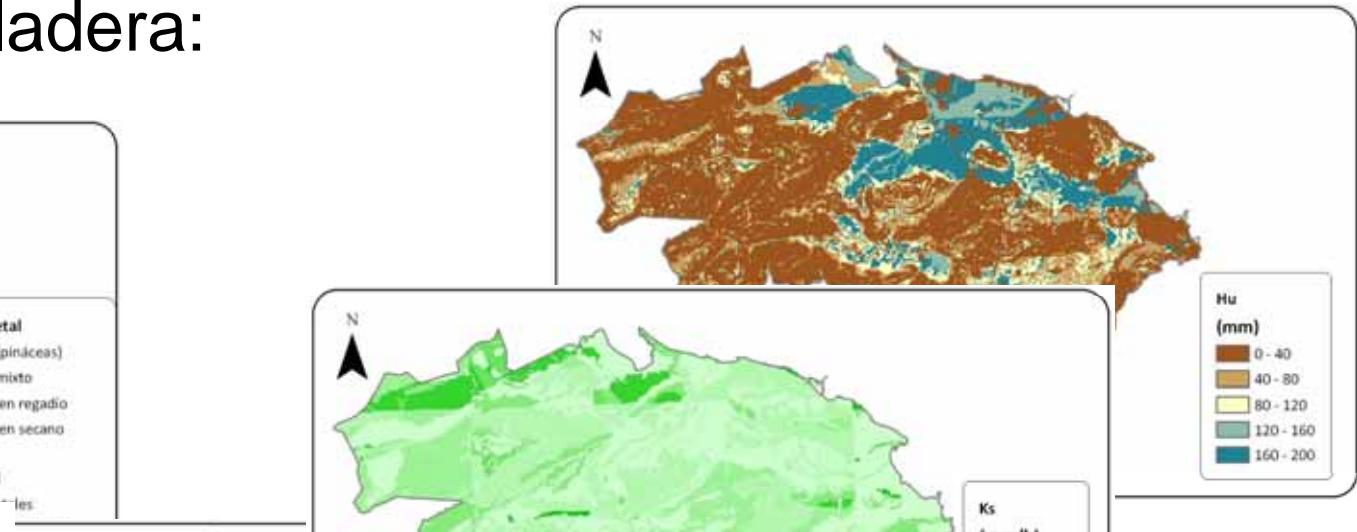
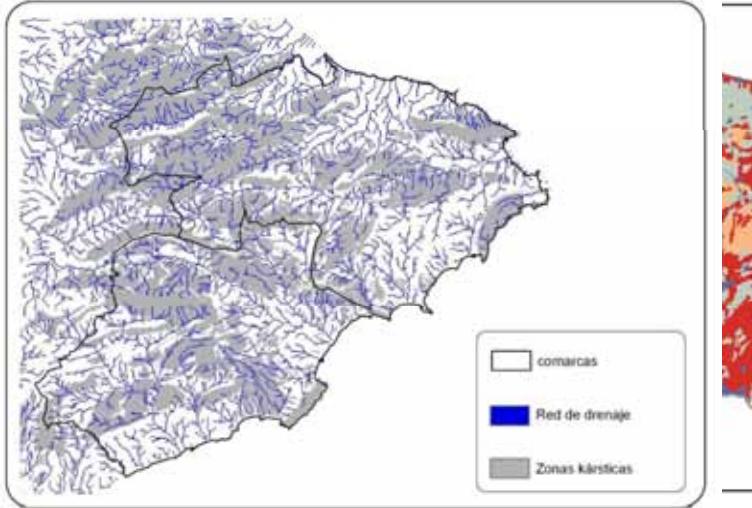
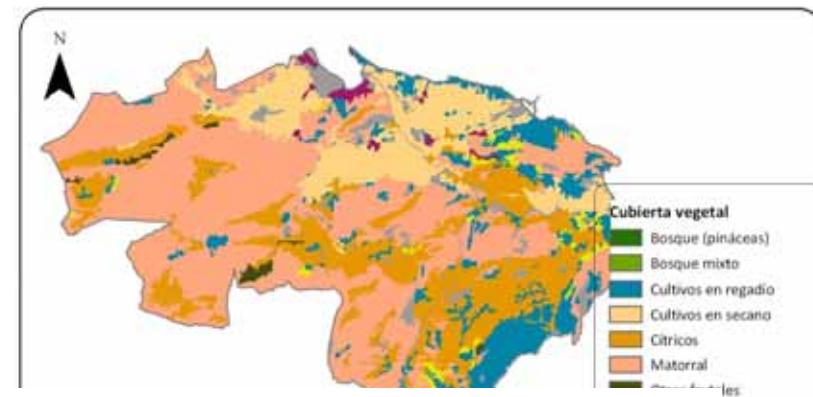


- Estimación de parámetros espaciales
 - Derivados del MED:



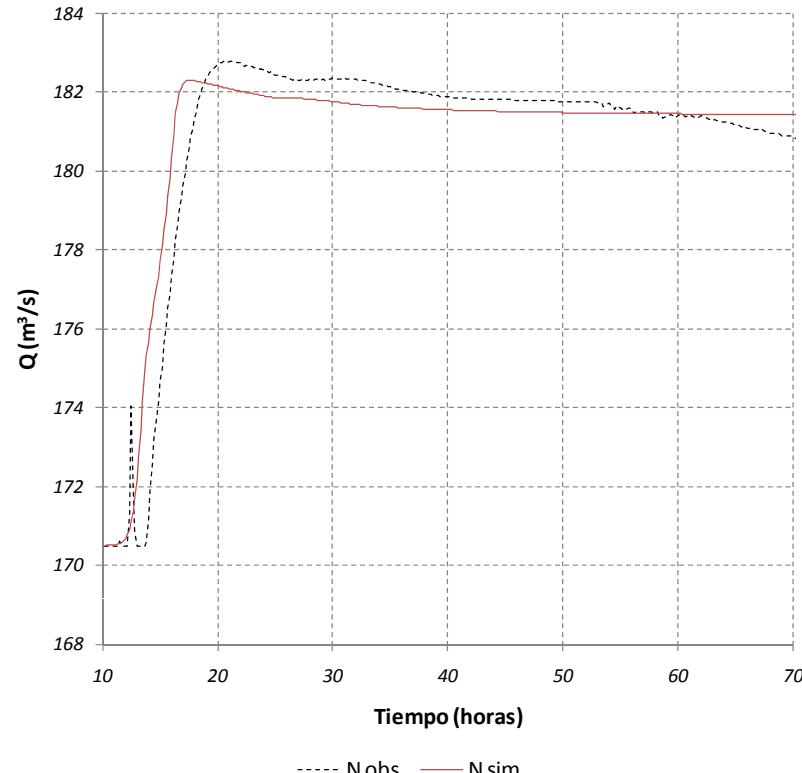
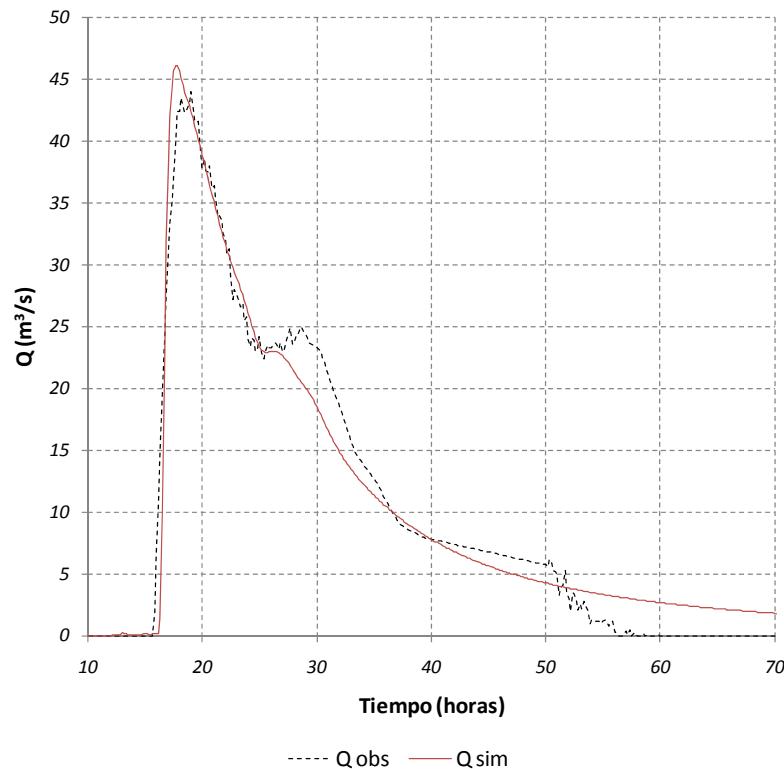
□ Estimación de parámetros espaciales

➤ Parámetros de ladera:

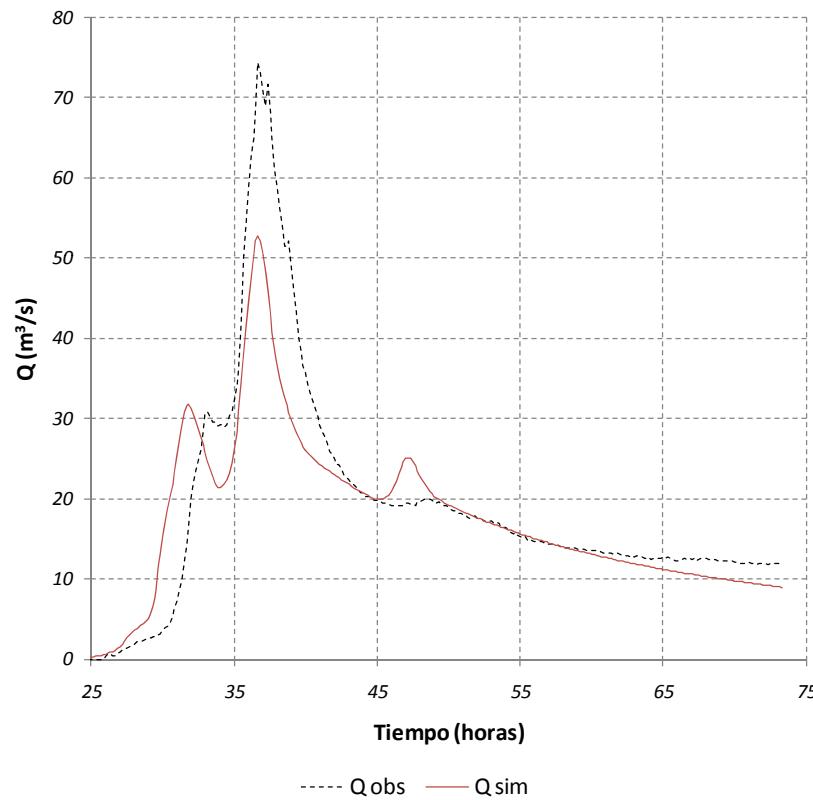


Modelo hidrológico: TETIS v8.1

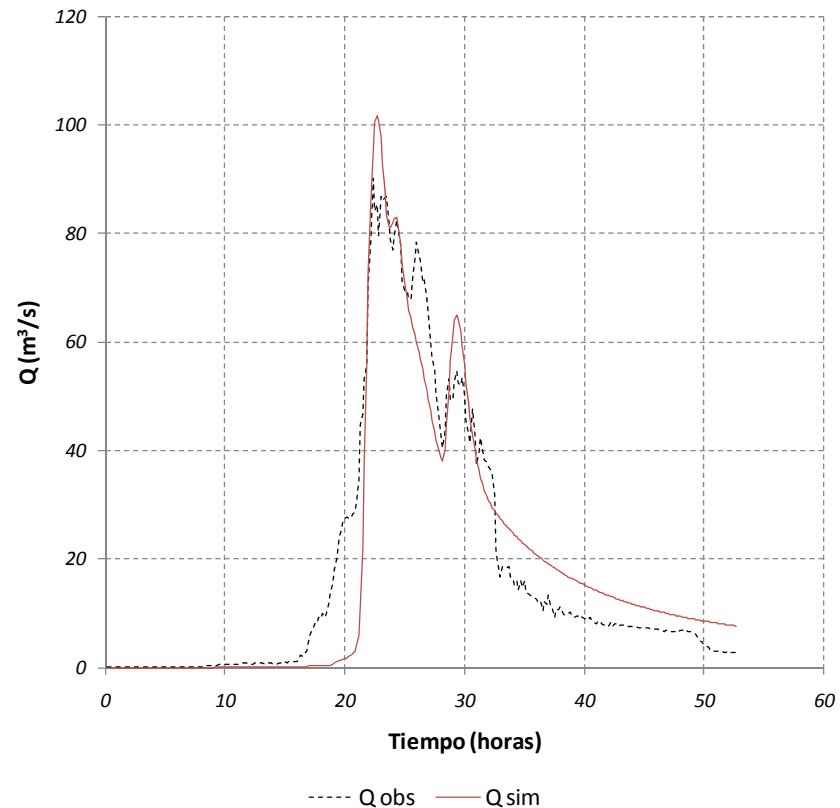
- Calibración: Caudal salida y nivel en embalse simulado y observado del evento de Abril 2003 en la estación SAIH “Isbert”



□ Validación espacio-temporal



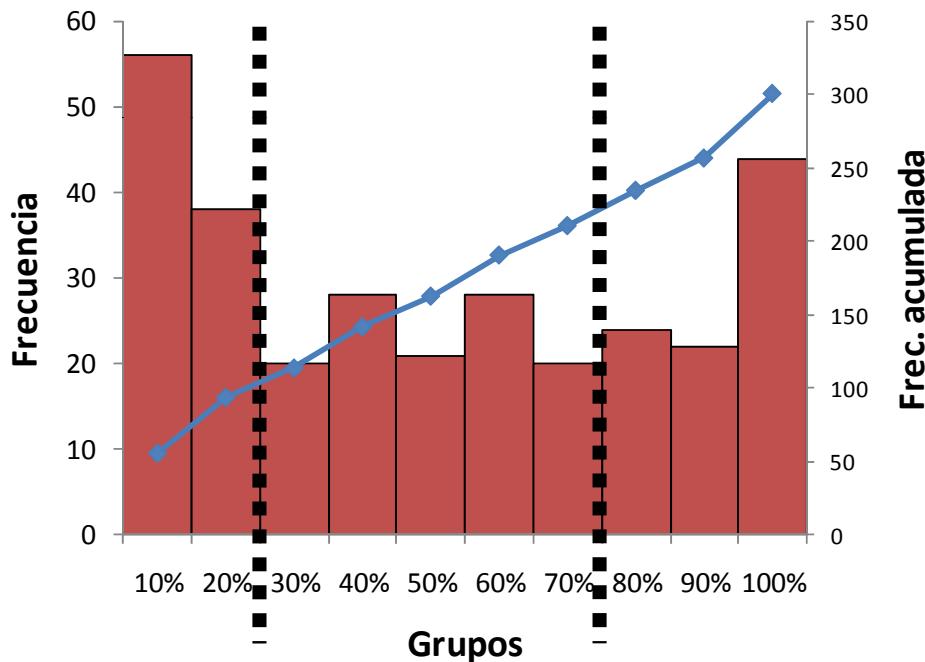
Estación de aforo de Marina Baixa, evento de Mayo 2002



Estación de aforo de Guadalest, evento de Octubre 2007

Análisis estado humedad inicial

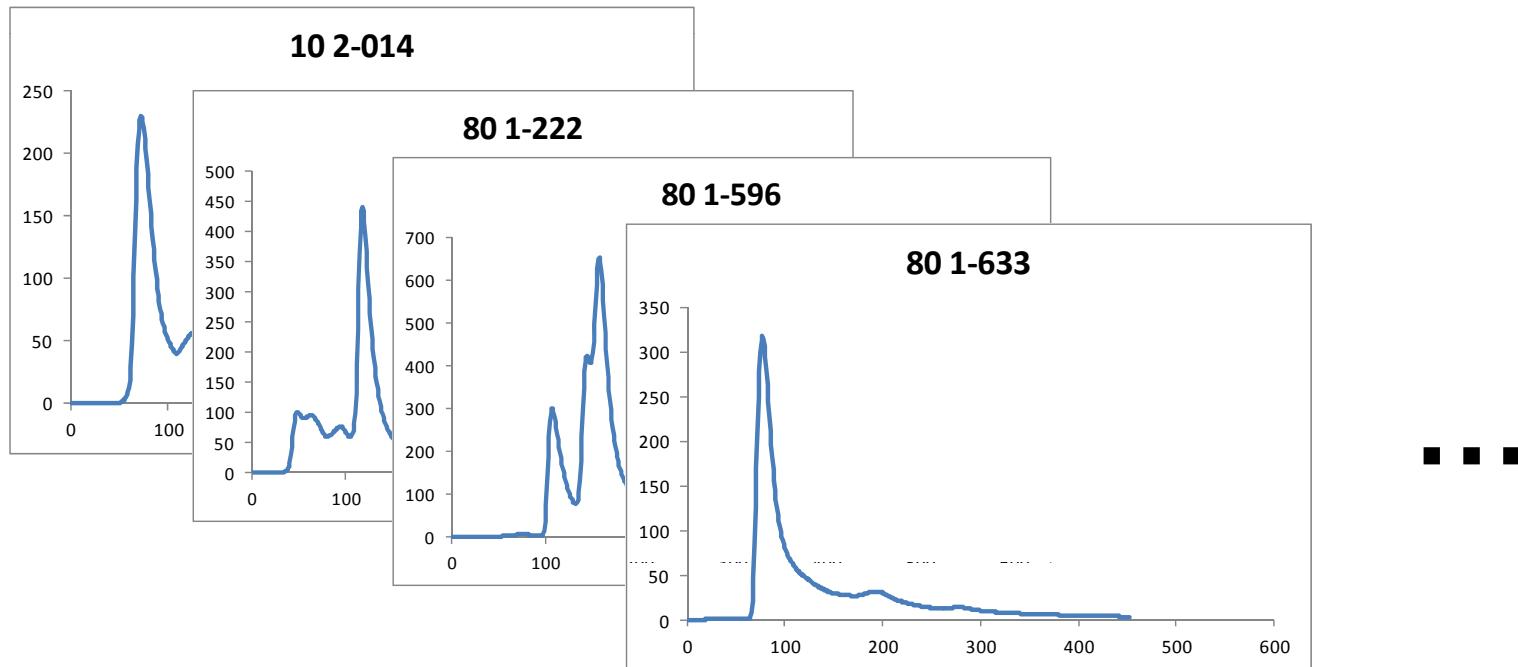
- Ajuste modelo diario en Rambla Gallinera
- Simulación continua 1943-2010
- Análisis frecuencia estados para $P_d > 30\text{mm}$
- 3 estados de humedad:
 - Seco (10%) $P = 0,3$
 - Medio (40%) $P = 0,4$
 - Húmedo (80%) $P = 0,3$



Histograma y distribución acumulada de humedad antecedente en el suelo obtenidos por simulación continua en la Rambla Gallinera

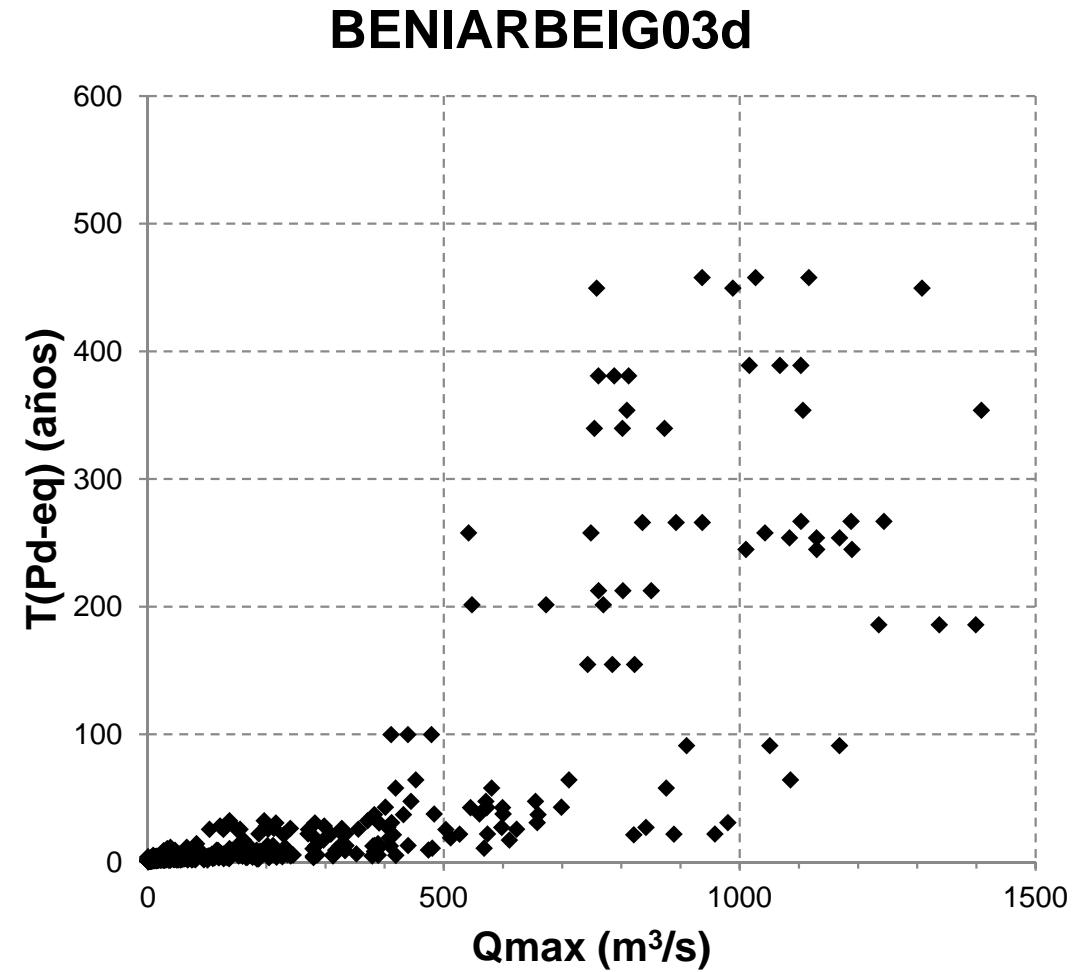
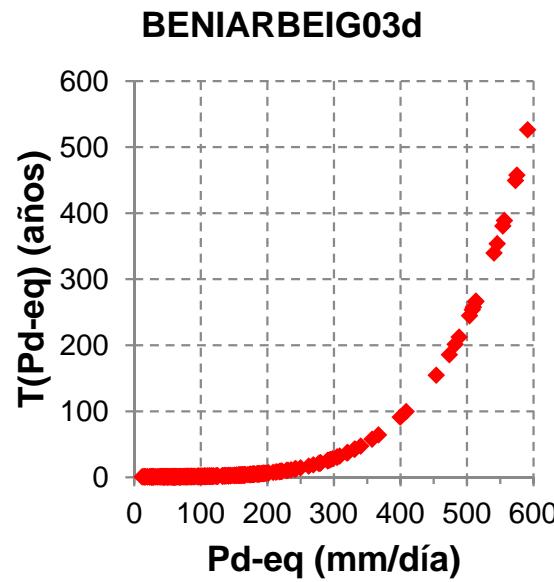
Simulación hidrogramas sintéticos

- 368 tormentas x 3 estados de humedad = 1104 eventos
- En algunas cuencas además x escenarios futuros que afecten la hidrología



Hidrogramas generados en la desembocadura del Girona (Benairbeig03d)

Caudales pico en función de T(Pd)

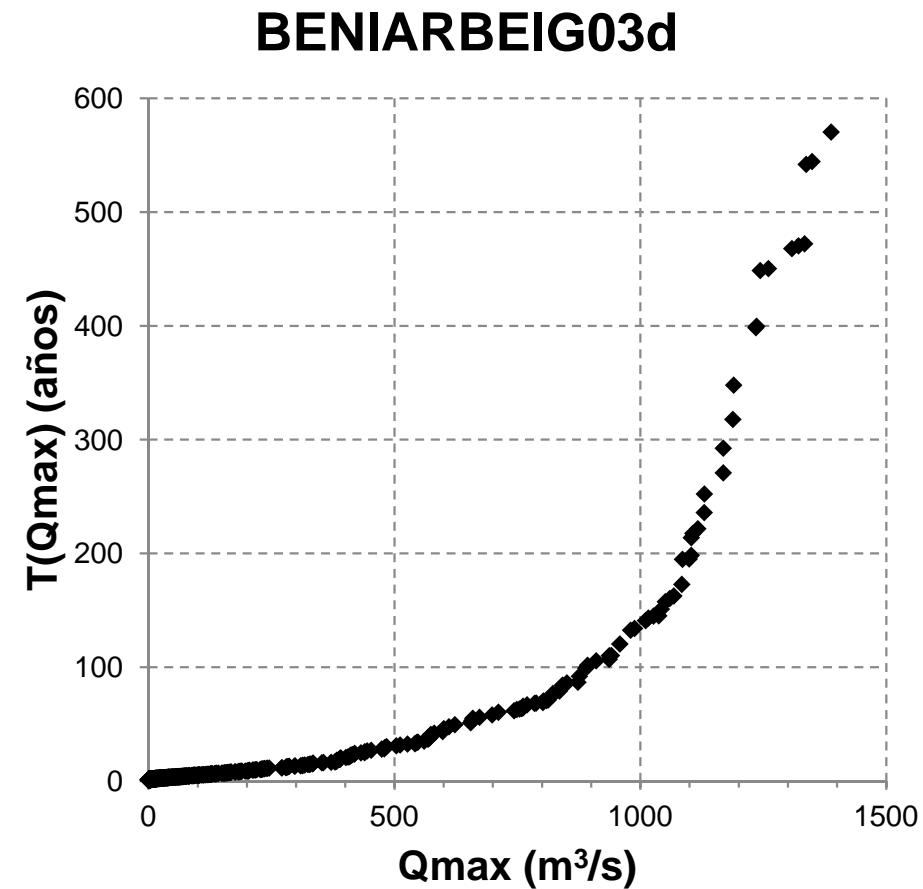
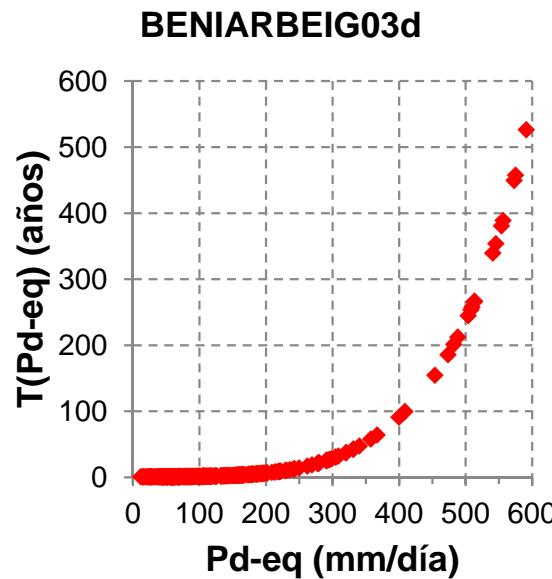


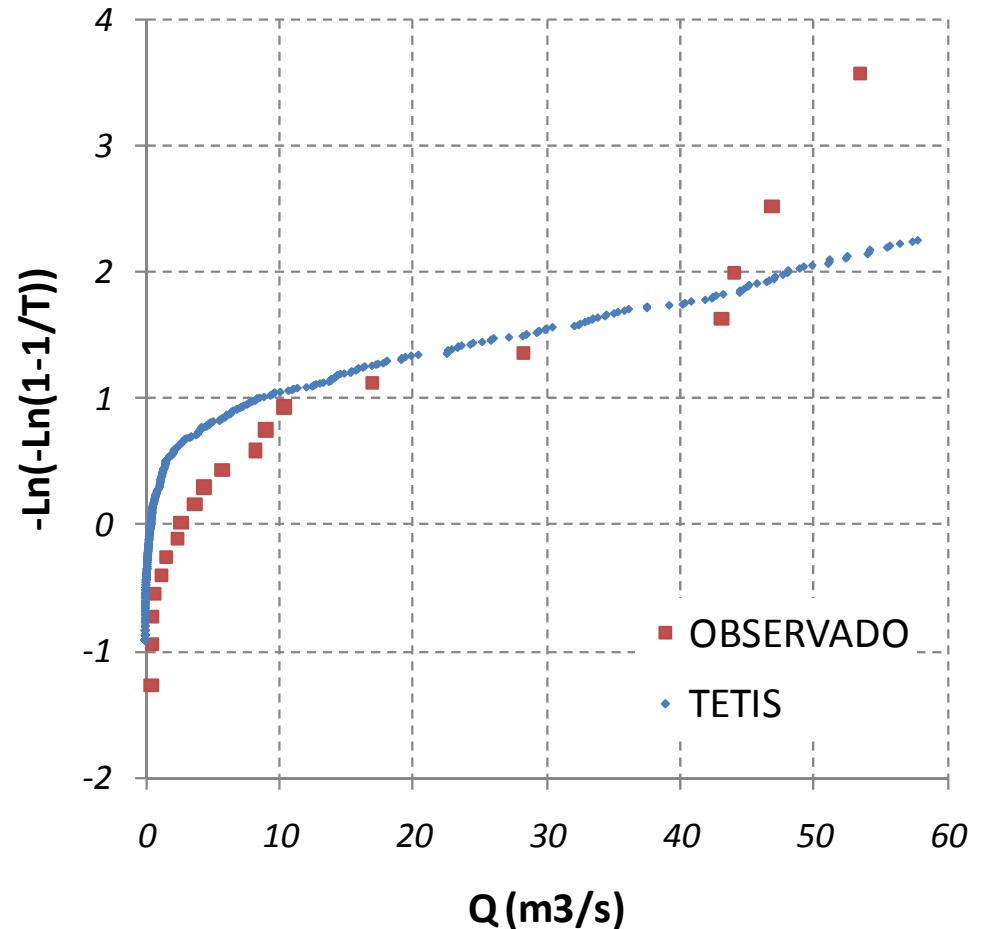
- Modelo multivariado de:
 - R = precipitación areal máxima de 24 horas
 - X = caudal pico (o variable de interés)
 - M = Estado de humedad inicial del suelo
 - Variable discreta (tres estados en este estudio)
- Finalmente la distribución marginal empírica de X:
 - Se conocen las marginales de R y M
 - Si M es independiente de R

$$F_X(a) \approx \sum_{j=1}^3 \left\{ P_j \sum_{i=0}^{\infty} \frac{n_{ij}(a)}{N_{ij}} [F(R_{i+1}) - F(R_i)] \right\}$$

Asignación de probabilidad

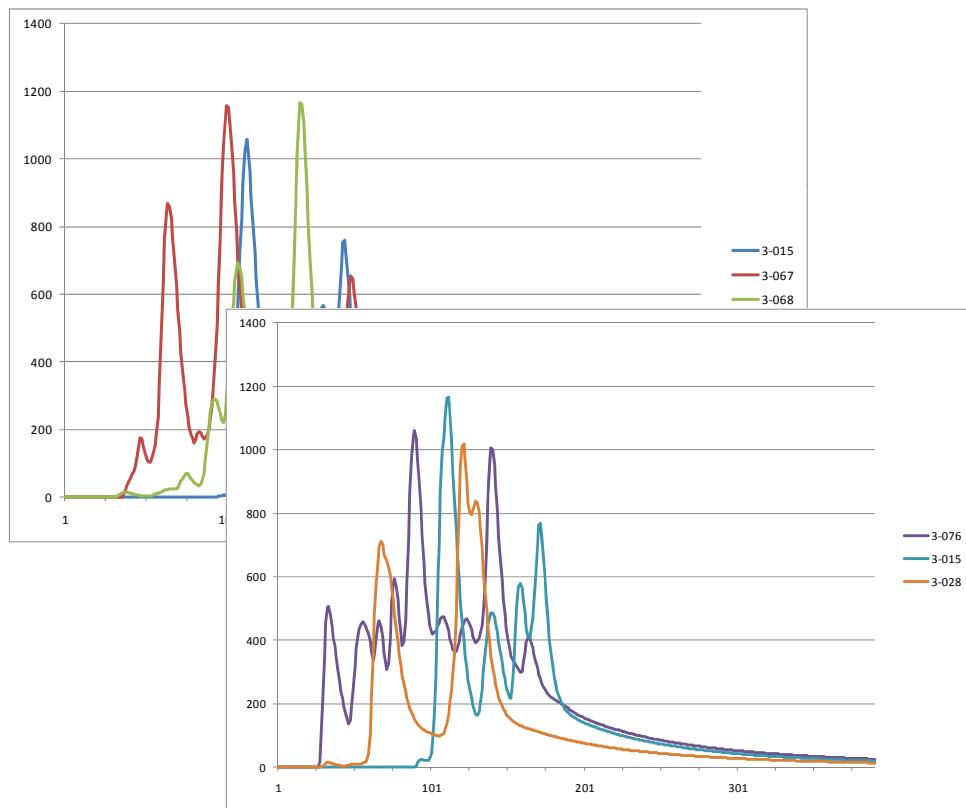
- Función de distribución de probabilidad en la desembocadura del Girona



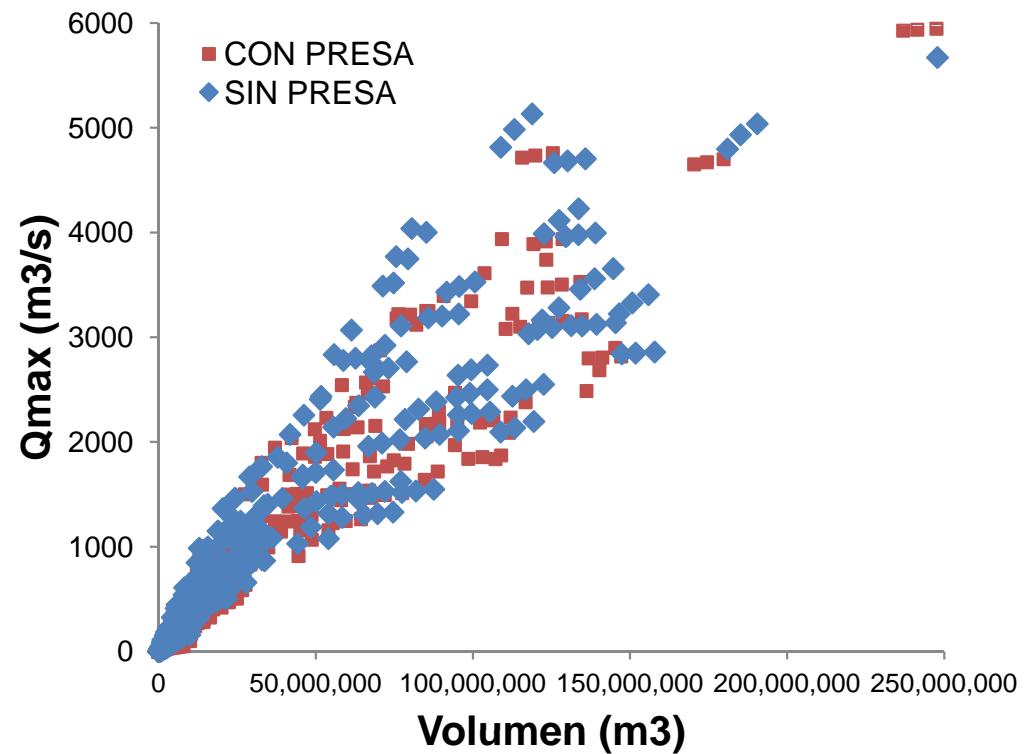


Estación de aforo de Gallinera.
Funciones de distribución empíricas de
los caudales máximos.

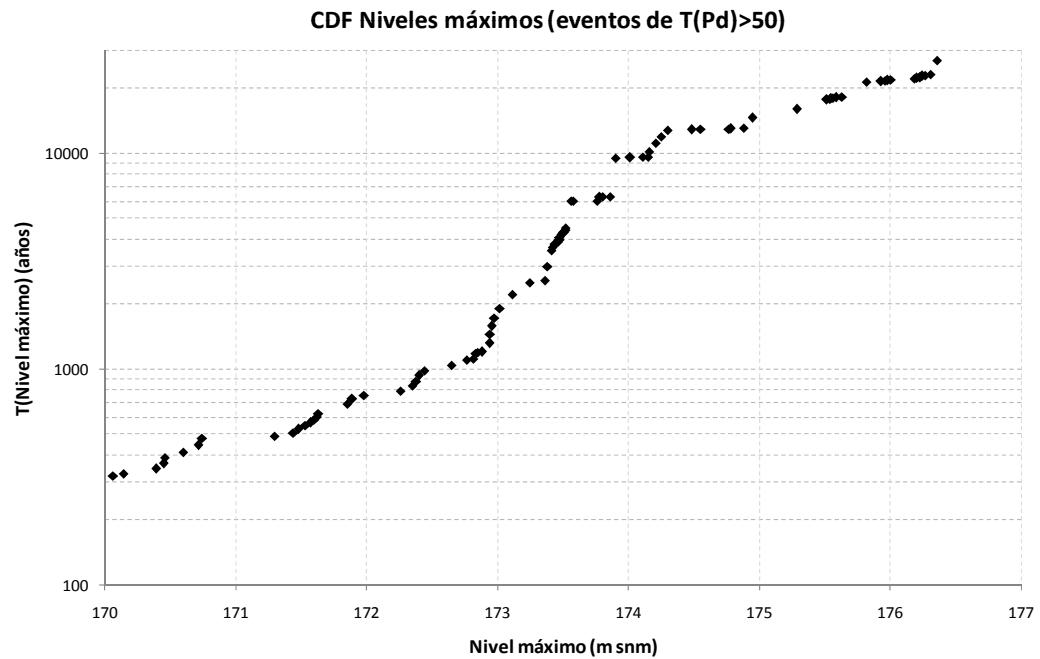
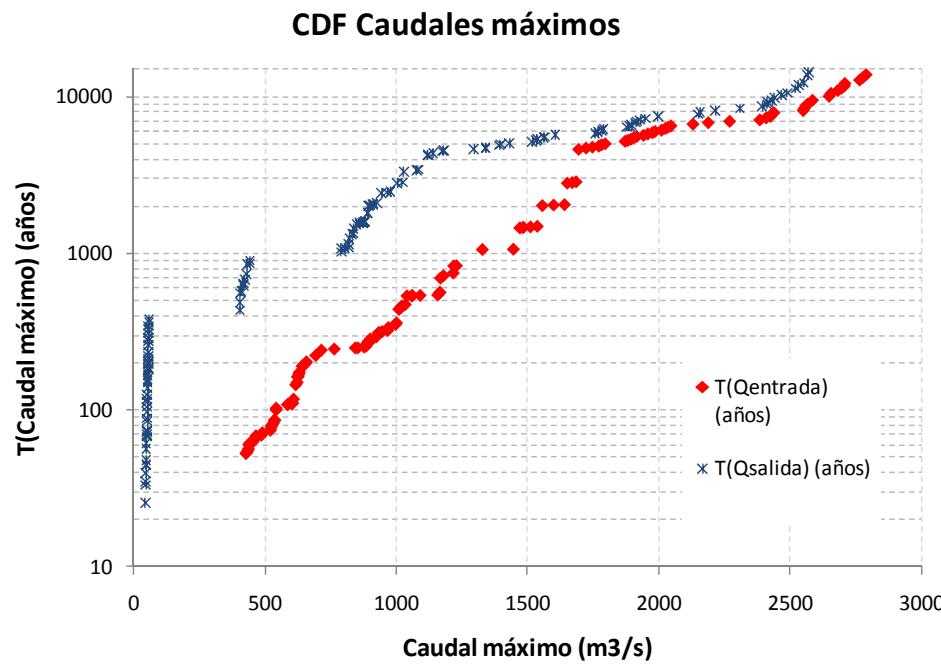
- Futuro embalse de Isbert: análisis múltiples hidrogramas similar magnitud



Selección eventos con Q_p entre 400 y 500 años



- Futuro embalse de Isbert: análisis estadístico variable de interés

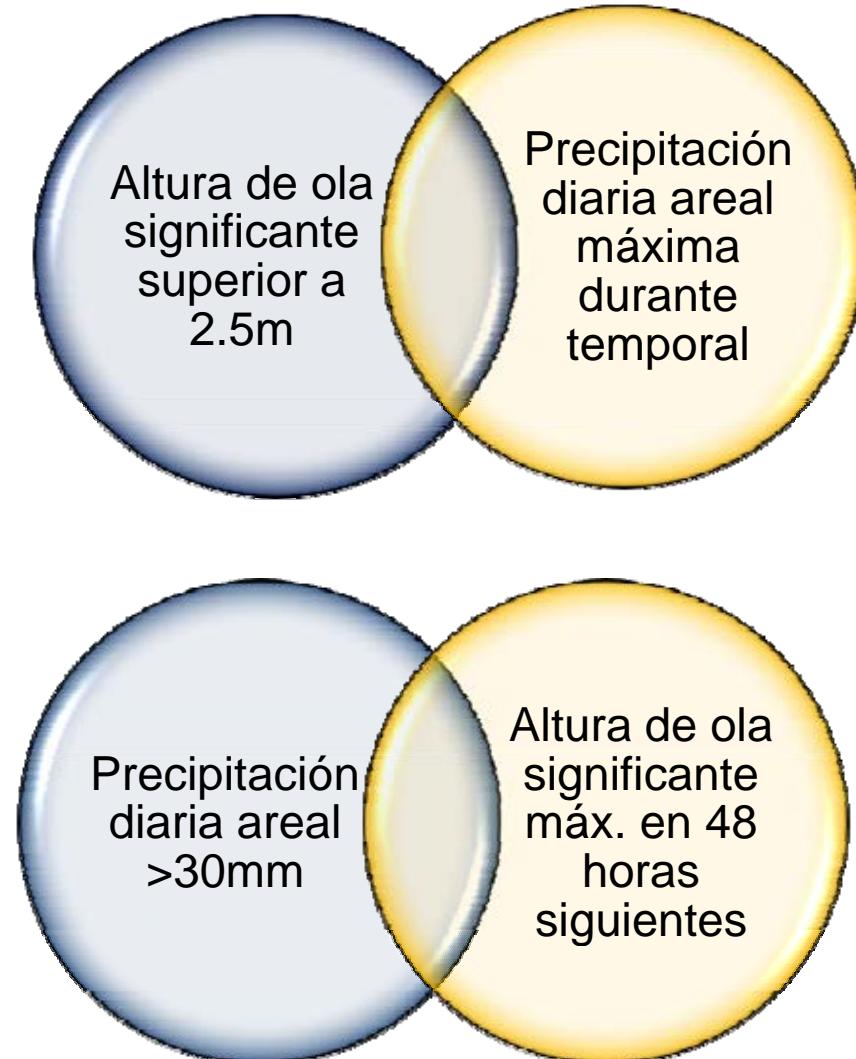


Inundaciones costeras

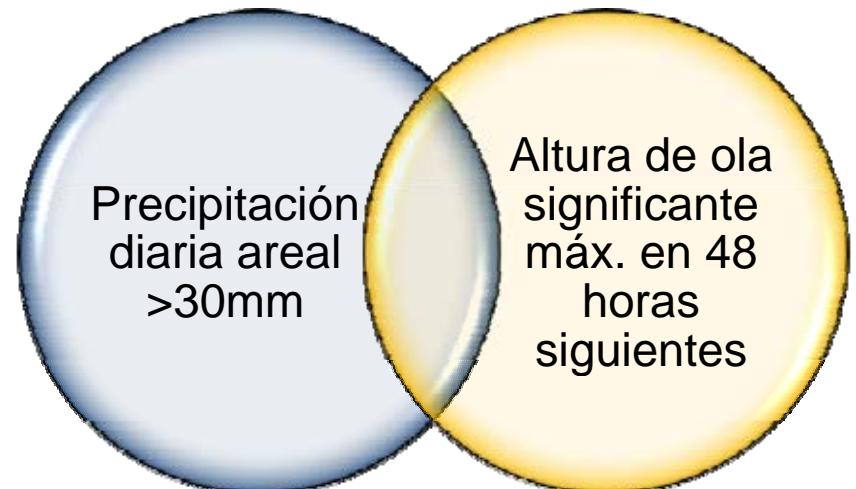
- Tratamiento independiente => **infravaloración**
- Nivel constante del nivel del mar => aproximación **grosa**
- Dependencia total: tormenta y temporal se producen simultáneamente y con el mismo T => **sobrevaloración**
- Modelación conjunta: pocos trabajos

Defra/Environment Agency (2003, 2005)

Proyecto Integrado *FLOODsite* (2008)

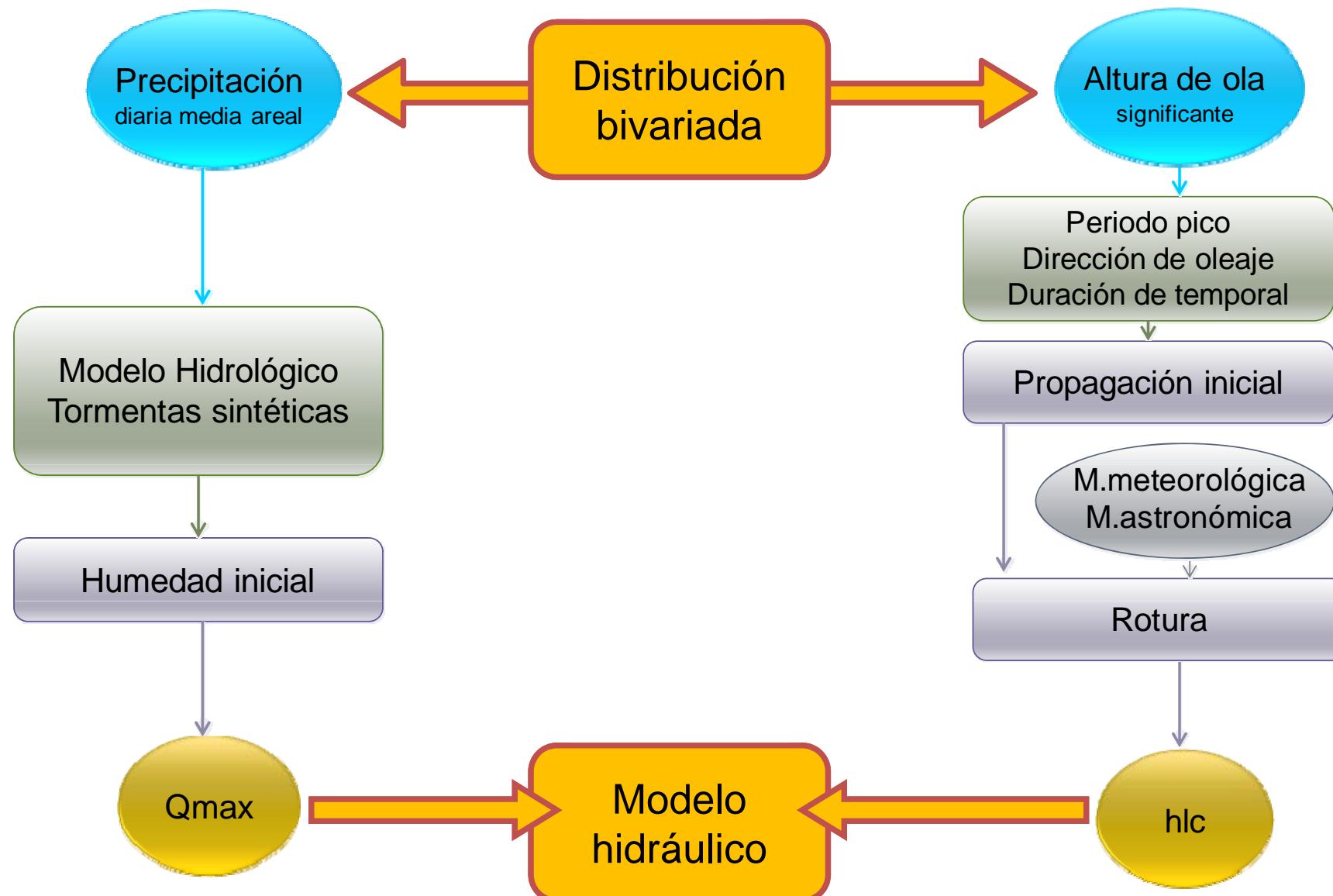


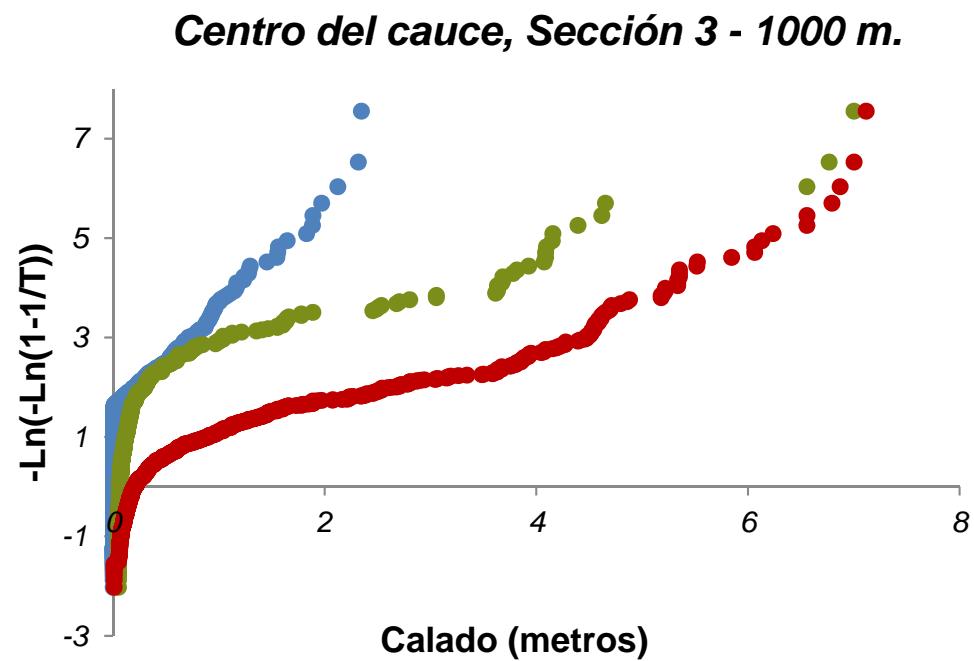
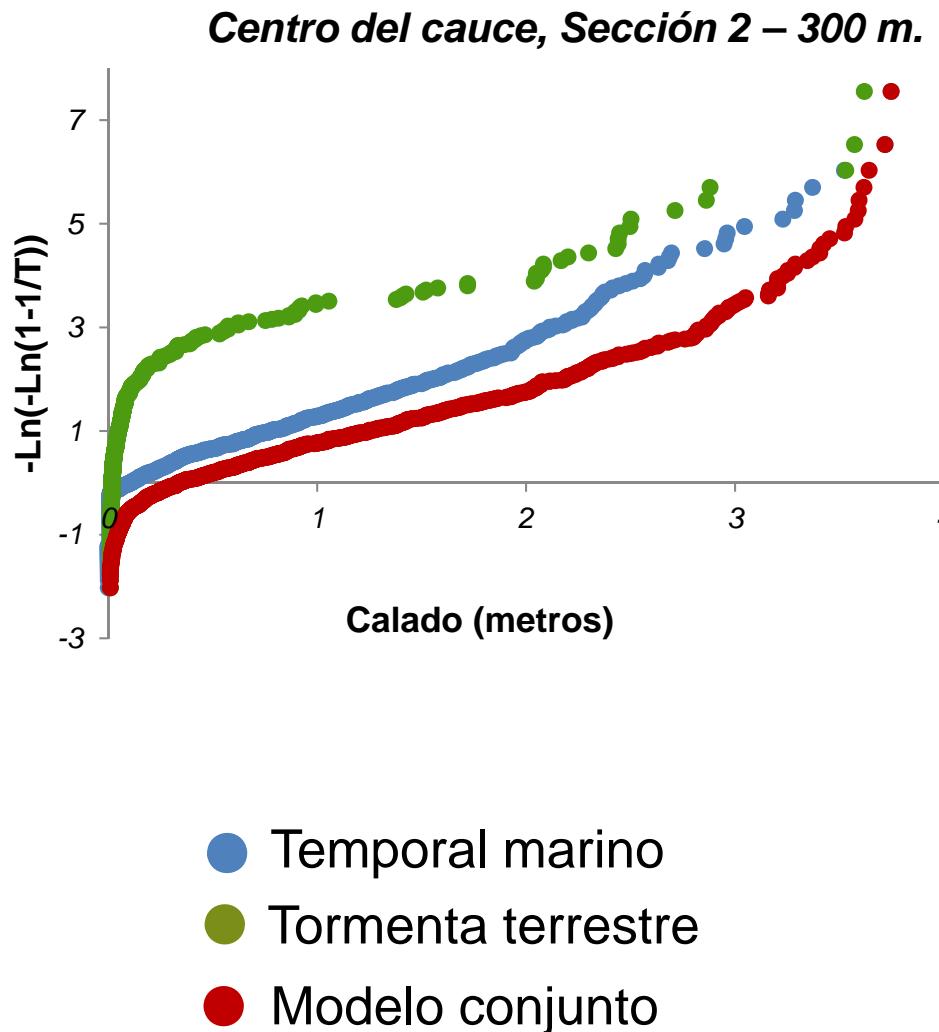
=> Correlación 0,12 y significativa



=> Correlación 0,18 y significativa

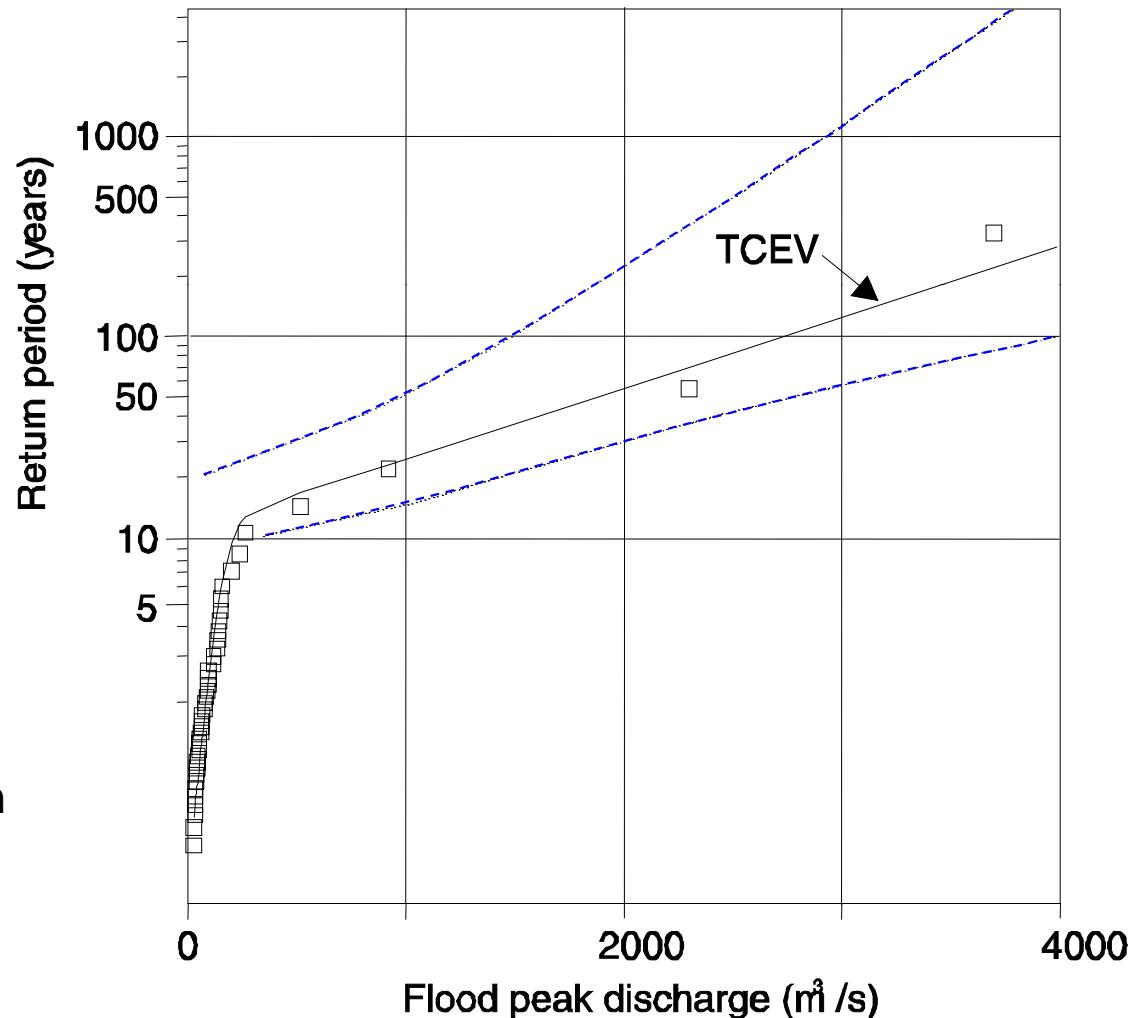
Propuesta de modelación conjunta





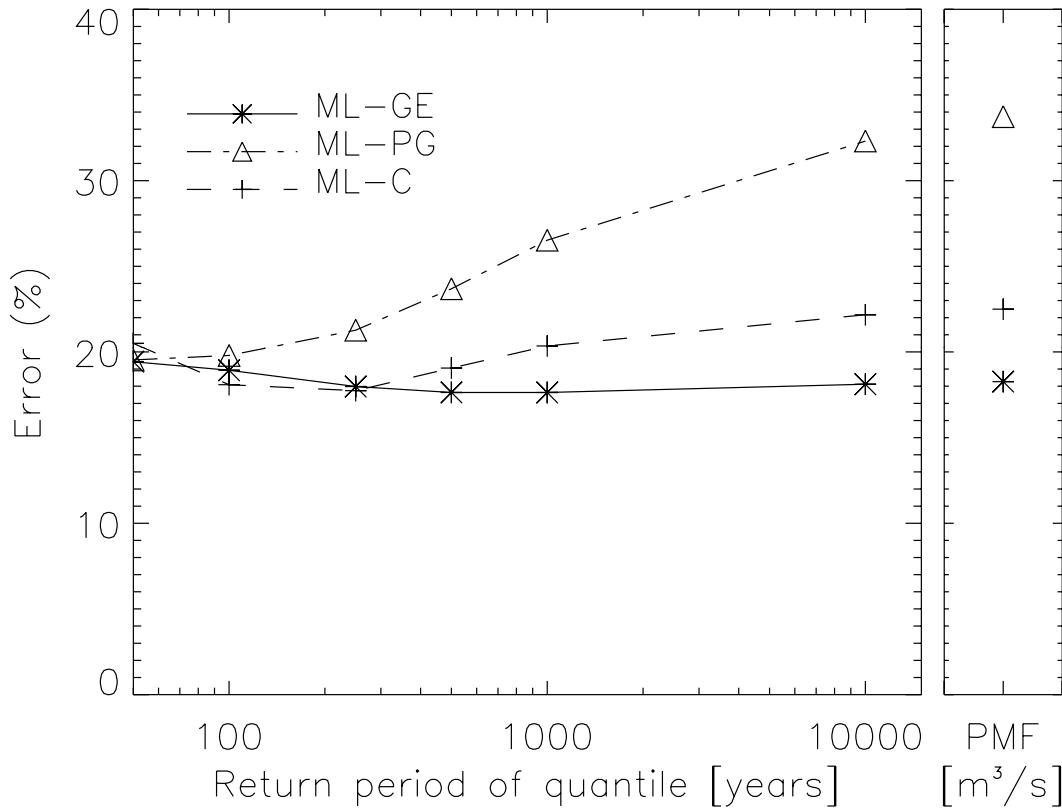
Estimación de la incertidumbre

- Estimación matemática de la varianza del estimador (o de su varianza asintótica)



Ajuste TCEV al río Turia en
Manises con intervalos de
confianza del 95 %

En modelos estadísticos



$$E(\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{\theta}_i - \theta)^2}}{\theta} \cdot 100$$

- O mediante simulación por Monte Carlo

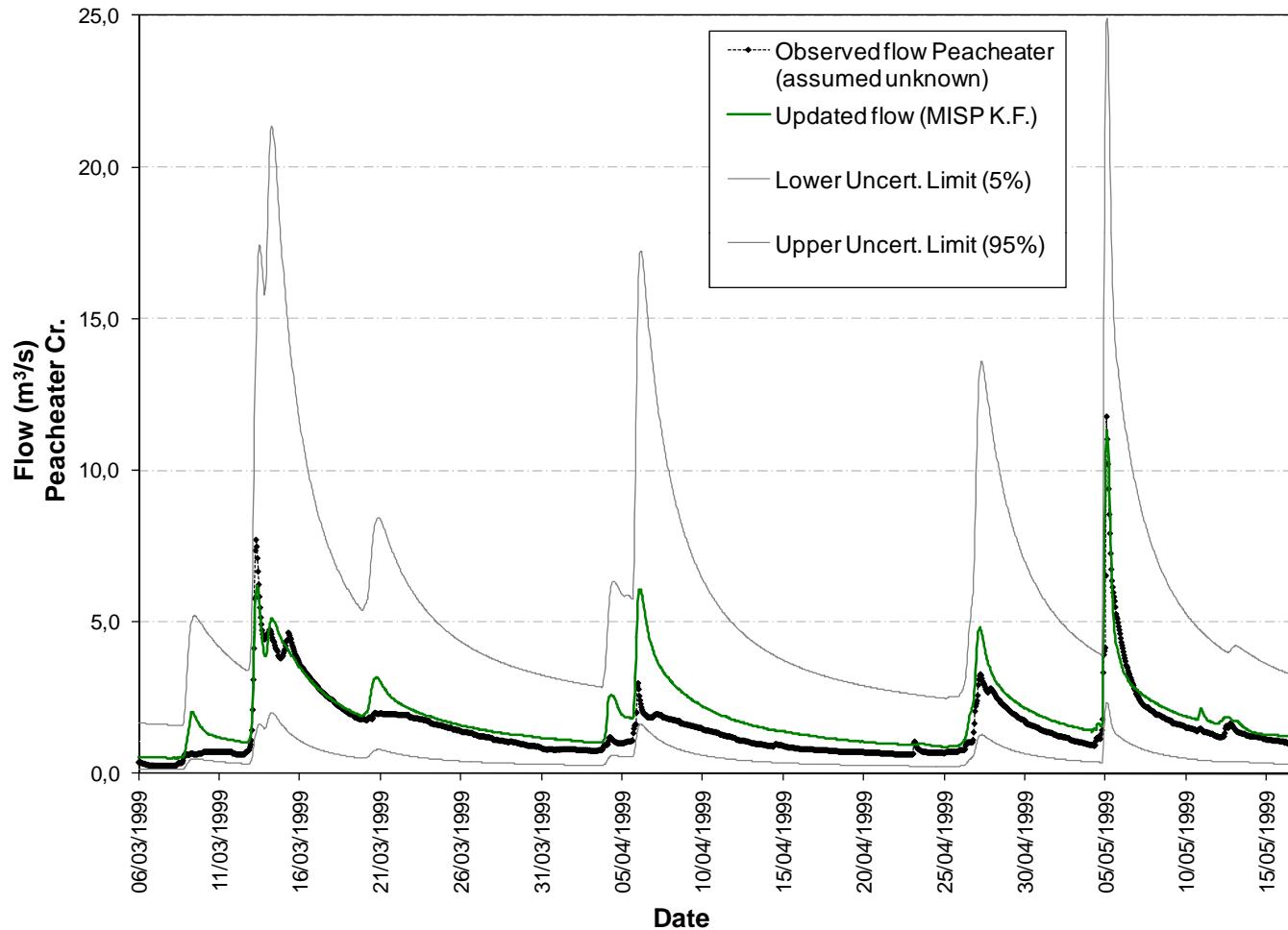
EV4 quantile uncertainty in Jucar River.
Simulations with:

N = 50 years
M = 400 years
H = 50 years return period
 $\gamma_x = 5.77$

Errors in G with
CV = 0.3
bias = +10%

En simulación cuencas no aforadas

- Aplicación de un filtro de Kalman (MISP) sobre simulaciones con TETIS calibrado aguas abajo:

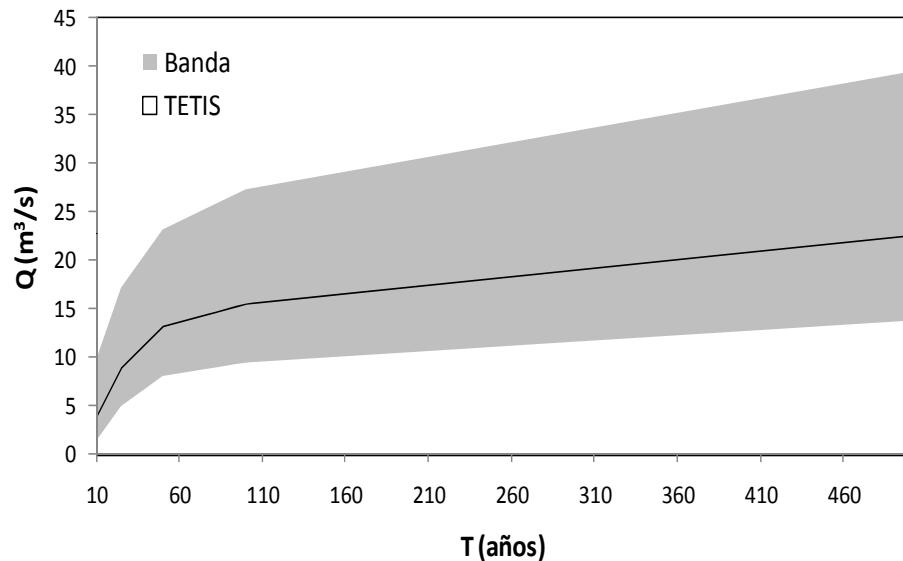


Peachester Creek, uncertainty bounds (06/03/1999 – 17/05/1999)



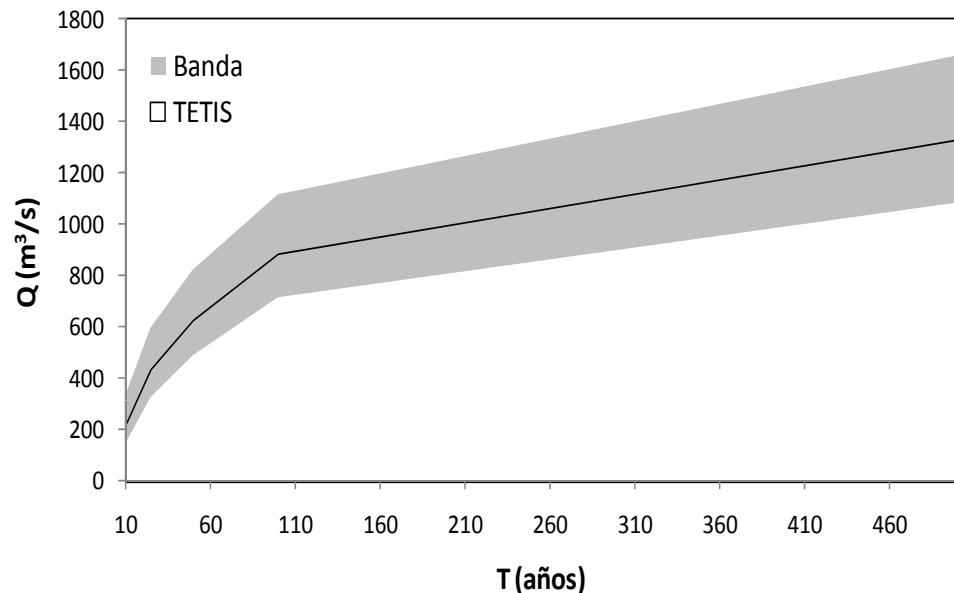
En el Estudio de las Marinas

- Aproximación de la incertidumbre con sensibilidad al error en parámetros de producción escorrentía (de 50 a 25%):



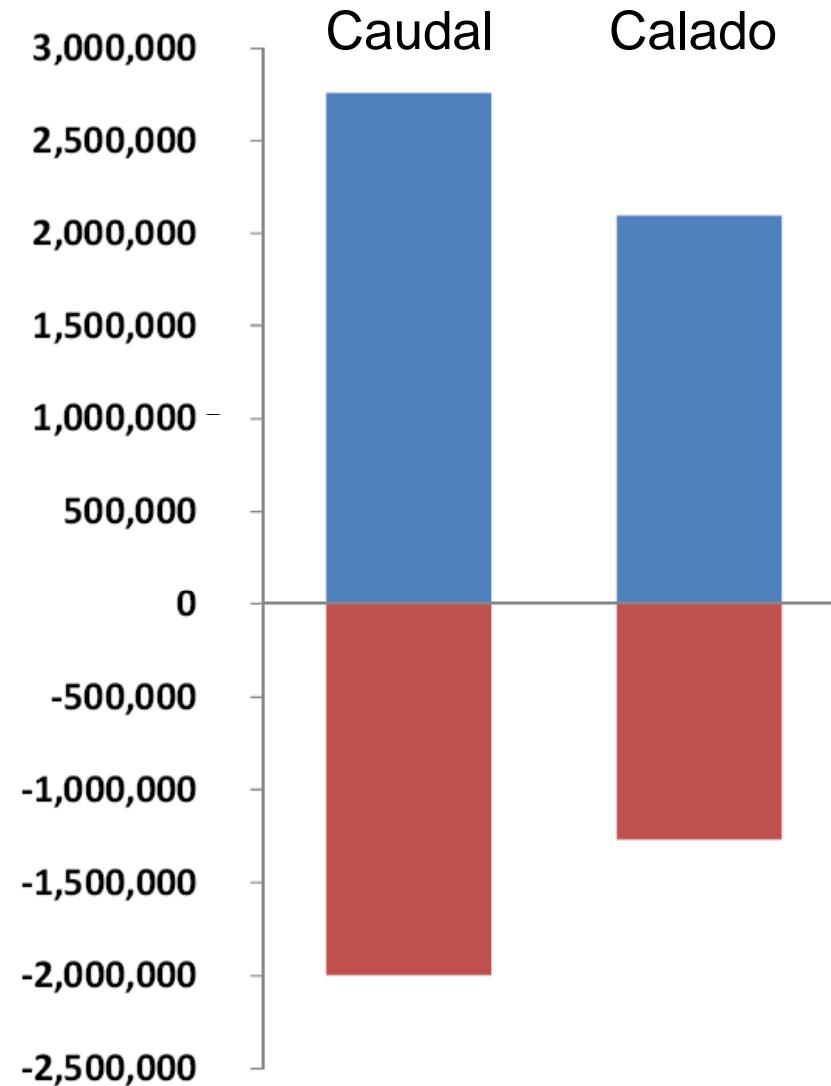
Río Girona en desembocadura
(110.73 km²)

Barranco de Benihome, afluente Girona
en Beniarbeig (**0.67 km²**)



- Exigible la máxima precisión en función de las implicaciones económicas y sociales
 - En ZI de Rambla del Poyo, en 2006 el riesgo económico sólo por daños directos era de **7,7 millones de €/año**
 - La sensibilidad a los errores es:

- Error -20%
- Error +20%



Agradecimientos

Ignacio Vélez, Juan C. Yuste, Sandra García, Eduardo Albertosa, Julián Vélez, Miguel Mondría, Andreu Roig, Sindo Alonso, Ronald Wenstein, Pablo Martín, Javier Benito, Gonzalo Gómez, Miguel A. Zorrilla, Marcos Pereira, Mar Gómez, Carlos Barrios, Antonio Huerta, Mario Hernández, Enrique Ortiz, Enrique Lorente, Gonzalo Gómez, Joan Palomares, Juan A. Pascual, Javier González, José M. Giménez, Victor Rozalén, Gabrielle Coccia, Francisco Vique, Miguel Serrano, Vicente Bellver, Antonio Nicolás, Àlvar Escrivà, Ignacio Marcos, Andrea Lamberti, Alejandra López, Rosa Orient, Juan J. Montoya, Virginia Dávila, Diana Quevedo, Delva Guichard, Marino Puricelli, **Juan C. Múnera, Blanca Botero**, Belén Sánchez, **Estefanía Fernández**, Guiomar Ruiz, Lina Ramirez, Marta Pasquato, Ilona Vaskova, Chiara Medici, Marco Morales, **Sergio Salazar**, Miguel Barrios, Ismael Orozco, **Gianbattista Bussi**, Joaquín Real, **Jesús López**, Alicia García, Lía Ramos

Juan B. Marco, Vicente Fullana, Joaquín Andreu, José Salas, José R. Témez, Joan Mateu, Duane Boes, Morel Seytoux, Ignacio Rodriguez-Iturbe, Michele Lang, Juan Valdés, Mariano Barriendos, María C. Llasat, Rafael García Bartual, Juan F. Fernández, Manuel Menéndez, Teodoro Estrela, Vicente Serrano, Javier Ferrer, Enrique Cifres, Julián Allepuz, José Antón, Diego Irles, Francisco Franch, Antonio Jiménez, Federico Estrada, Francisco Cabezas, Ramiro Martínez, Vicente Guna, José M. García Ruiz, Francisco Martínez Capel, Ramón Domínguez, Andrew Wade, Fermín López, Pierre Julien, Vicente Llorens, Fernando Ricart, Luis Juaristi, Carles Sanchis, José M. Ruiz, Francisca Segura, Pilar Carmona, Ana Camarasa, Ángel Cayuela, Juan Carlos Girbés, Juan Calatayud, Ángel Latorre, José L. Miralles, Thomas Glade, Gerardo Benito, Teresa Ferreira, Ángel Eraso, Miguel Francés, Francesc Gallart, Luis Garrote, Gregory Egger, Francesc Sabater, Ezio Todini, Soorosh Sooroshian, Günter Blöschl, Axel Bronstert, José Aguilar, Mike Smith, Daniel Sempere, Mauro Nagethini, James Smith

Plan Nacional de I+D+I, Programa de Projectes d'Investigació i Desenvolupament Tecnologic "Generalitat Valenciana", CICYT, Framework Programs of the European Commission, INTERREG III C, Programa Intercampus de la AEI, Era-net CRUE Funding Initiative, Universitat Politècnica de València, Era-net IWRM Funding Initiative, Parques Nacionales, Plan CONSOLIDER, Confederación Hidrográfica del Júcar, GRHSA, EPTISA, Confederación Hidrográfica del Segura, Ayuntamiento de Valencia, Empresa Nacional ADARO, Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports, ICTSA, Ayto. de Cullera, IBERDROLA, INARTEC, Ayuntamiento de Benicassim, Sindicato Central de Regantes del Acueducto Tajo-Segura, Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Asocivil, Ayuntamiento de Humanes, HIDROWAT, INICIAS, URBINSA, FIRME CIVIL, Institut Turistic Valencià, STUDI7, Onden S.A., SACYR, Confederación Hidrográfica del Ebro, NECSO, CALDIGA, AIRTEL, CEMAGREF, Dirección General de Interior de la Consellería de Presidencia, INIPSA, IVALEYING, Dragados y Construcciones, Confederación Hidrográfica del Tajo, MS Ingenieros, Ingeniería CM, Dir. General de Carreteras del Ministerio de Fomento, Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, Ayuntamiento de Alzira, Agriconsa, FranJuan SL, Ayuntamiento de Benimuslem, Intecsia-Inarsa, Dpto. De Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno Vasco, Typsa, Gobierno Regional de Murcia, Conselleria de Agricultura de la Generalitat Valenciana, OCIDE, AMINSA, IDOM, Confederación Hidrográfica del Norte, INOCSA, Dirección General de Aguas del Ministerio de Medio Ambiente, Paymacotas, Ayuntamiento de Utiel, GETEC 2000, Asdara, Ingeniería y Promoción Bellver, Inypsa, I.V. Ingenieros Consultores, Vielca Ingenieros, Ayto. de Villanueva de Castellón, Ingropsa, Hidrogaia, Consellería de Territori i Habitatge, SENER, Agencia Vasca del Agua



GRACIAS POR SU ATENCIÓN

Prof. Félix Francés (ffrances@hma.upv.es)

*Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y
Ambiental (GIMHA)*

<http://lluvia.dihma.upv.es>

