



Instituto de Ingeniería del  
Agua y Medio Ambiente



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

# Modelación hidrológica distribuida de la cuenca Saja-Besaya (Modelo Tetis V.7.2), para estimación probabilística de avenidas en los períodos de estiaje

Autores:

**Félix Francés y Juan Camilo Múnera**

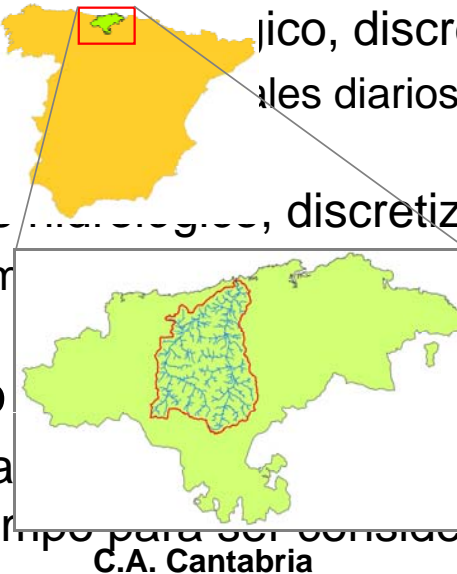
Universidad Politécnica de Valencia - España  
Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente  
Grupo de Investigación de Hidráulica e Hidrología  
<http://lluvia.dihma.upv.es>



XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica  
Cartagena de Indias, Septiembre 2008

# Objetivos del estudio

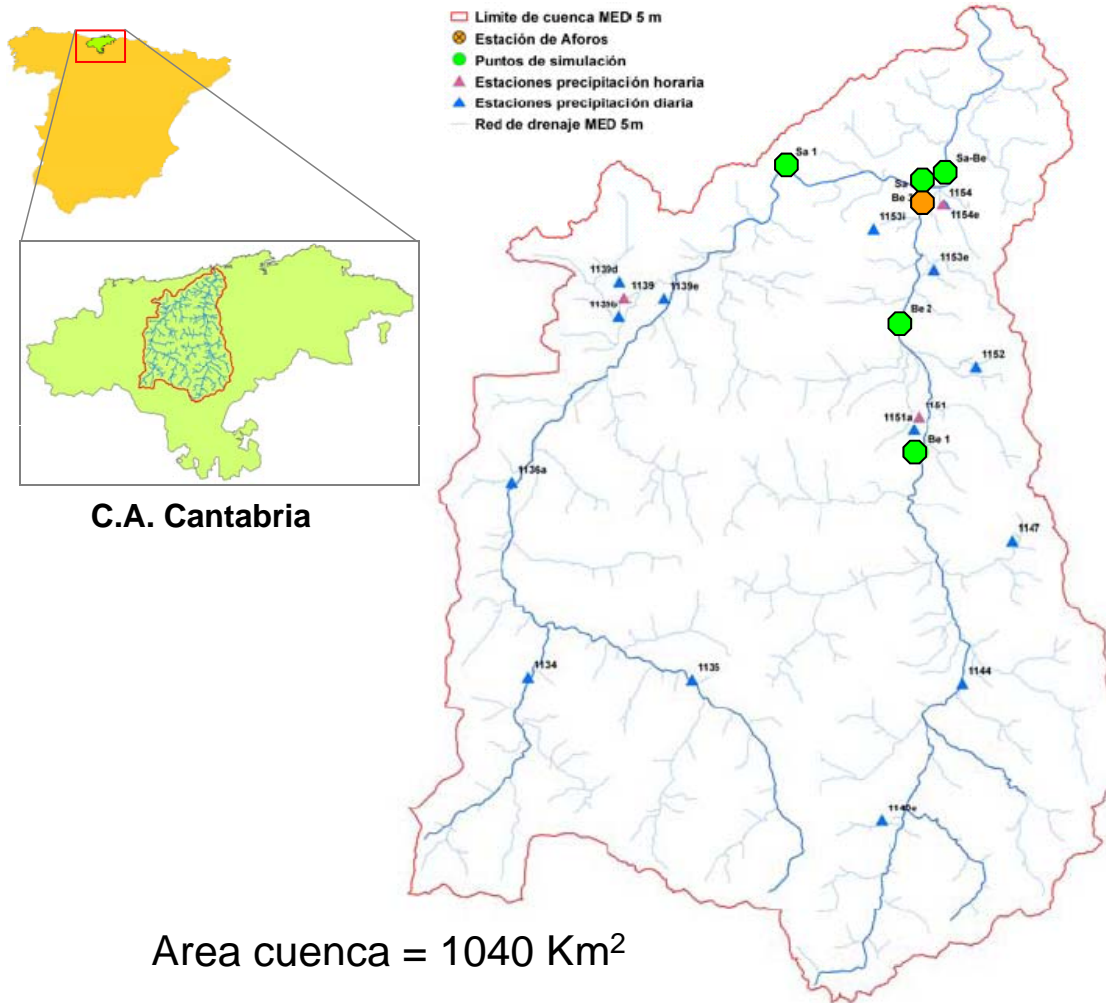
- Conocer el caudal que circula en los ríos Saja-Besaya cuando se producen las descargas de sistemas unitarios (DSU's) en las zonas urbanas de la cuenca baja.
- Generar caudales en varios puntos de la cuenca aguas arriba de la ciudad de Torrelavega y aguas abajo de la confluencia:
  - Implementar un modelo hidrológico, discretización temporal diaria:
    - Simular serie histórica de caudales diarios cerca de áreas urbanas (énfasis en caudales mínimos)
  - Implementar Modelo hidrológico, discretización temporal horaria:
    - Generar hidrogramas (en estación estival).
- Análisis probabilístico de los caudales
  - Caracterización estadística de caudales desde el inicio del hidrograma en el tiempo para ser considerados en la dilución de DSU's.



# Información disponible

- Información hidrometeorológica **diaria** suficiente
  - Buena cobertura pluviométrica diaria
  - Incertidumbre en aforos
  - ETP fuera de la cuenca
- Información espacial suficiente
  - Buena calidad del MED y mapas de vegetación
  - Información aceptable de suelos y geológica
- Información de evento (horaria) pobre
  - No hay hidrogramas con resolución temporal horaria o menor para calibrar
  - Lluvia horaria reconstruida en 3 puntos de la cuenca

# Localización del área de estudio, cuenca Saja – Besaya y puntos de interés



Area cuenca = 1040 Km<sup>2</sup>

## Características generales

Drenaje general Sur-Norte

Clima húmedo

Litología: Predominan arcillas y limonitas, conglomerados, areniscas, calizas y margas.

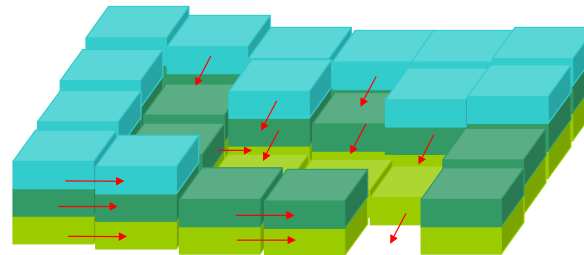
Suelos: predominan cambisoles

Vegetación: Bosques de robles y frondosas en partes altas; pastos, cultivos, matorral, eucaliptos y pinos en parte media-baja.

Red de drenaje en parte alta y media con altas pendientes y cauces encajonados.

# El Modelo hidrológico TETIS

- Desarrollado en la UPV desde 1994
- Distribuido en el espacio:
  - Reproduce la variabilidad espacial del Ciclo Hidrológico
  - Reducción del efecto de escala espacial
  - Explotación de toda la información espacio-temporal existente
- Modelación de propagación separada en laderas y cauces
  - Propagación no lineal en cauces mediante O.C.G. (IAHR, La Habana, 2002)



## ■ Parámetros geomorfológicos

- Conceptualización traslación escorrentía: Onda Cinemática Geomorfológica, Vélez, J.I. Tesis Doctoral (2001)

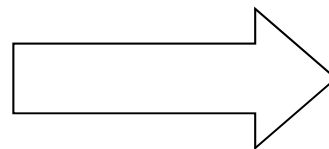
$$\Lambda = \kappa \cdot Q_b^\varphi$$

$$w_b = a_1 \cdot Q_b^{\alpha 1}$$

$$w = Q^{\alpha 2}$$

$$d = c_d \cdot (ys_o)^\theta$$

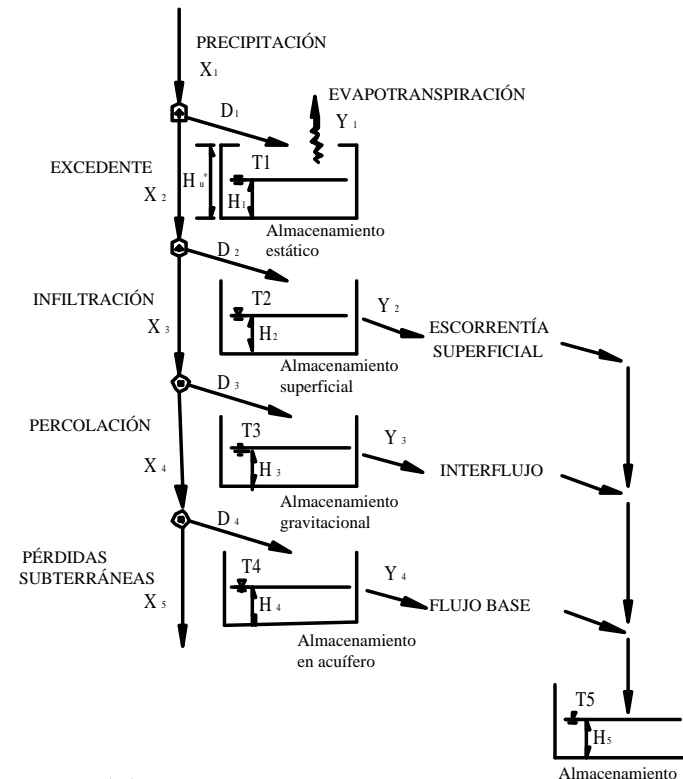
$$n = c_n \cdot d^\xi$$



$\kappa$	1.297
$a1$	3.130
$c_d$	6.516
$c_n$	0.047
$\varphi$	0.757
$\alpha 1$	0.509
$\alpha 2$	0.325
$\theta$	0.655
$\xi$	0.167

# Modelo hidrológico TETIS

- Modelo Global: incluye el balance en todo momento
  - Simulación adecuada de la humedad inicial
  - 5 variables de estado  $H(t)$
  - 4 flujos de salida  $Y(t)$
- Problema potencial con parámetros en modelos distribuidos:
  - Calibración de elevado número de parámetros en cada celda a partir de un hidrograma en la salida.
  - Solución: Estructura separada del parámetro efectivo:
    - Primera fase: estimación a partir de información física y ambiental
    - Segunda fase: Factor corrector global



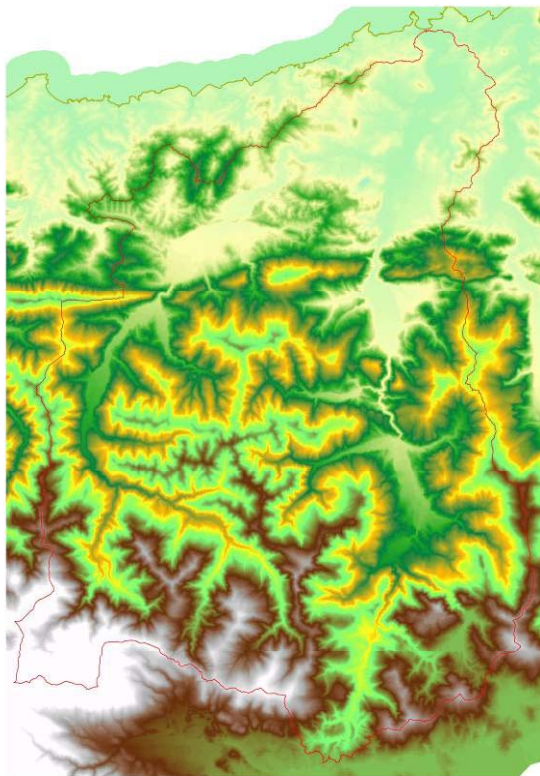
$$H_u(i)$$

$$H_u(i) \cdot R_1 \rightarrow \text{Calibración}$$

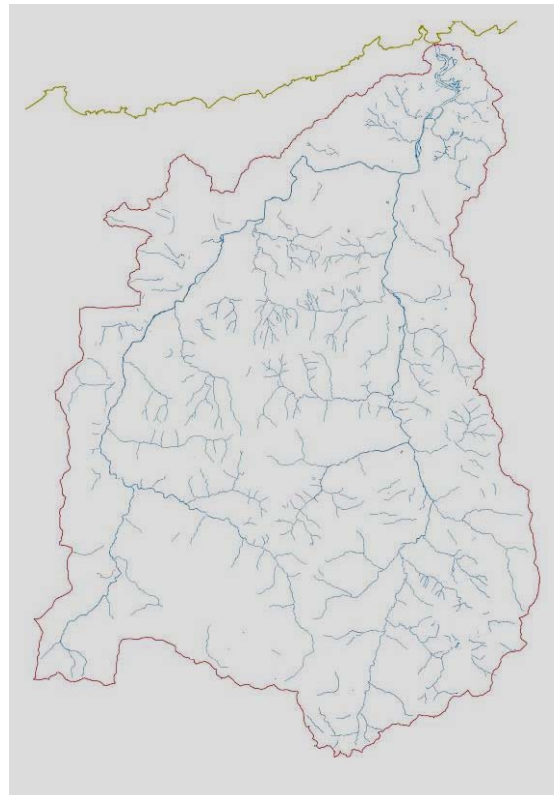


# Estimación de parámetros espaciales

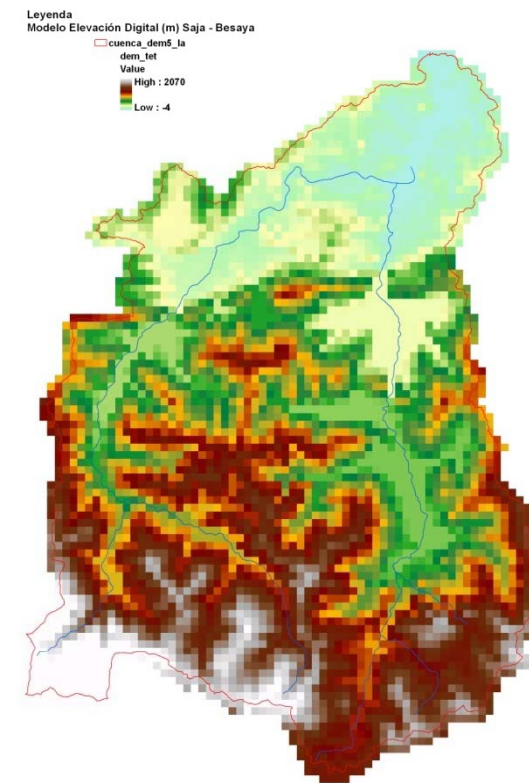
- Obtención del MED de 500 m agregado a partir del original:



MED de 5 m



Red de drenaje

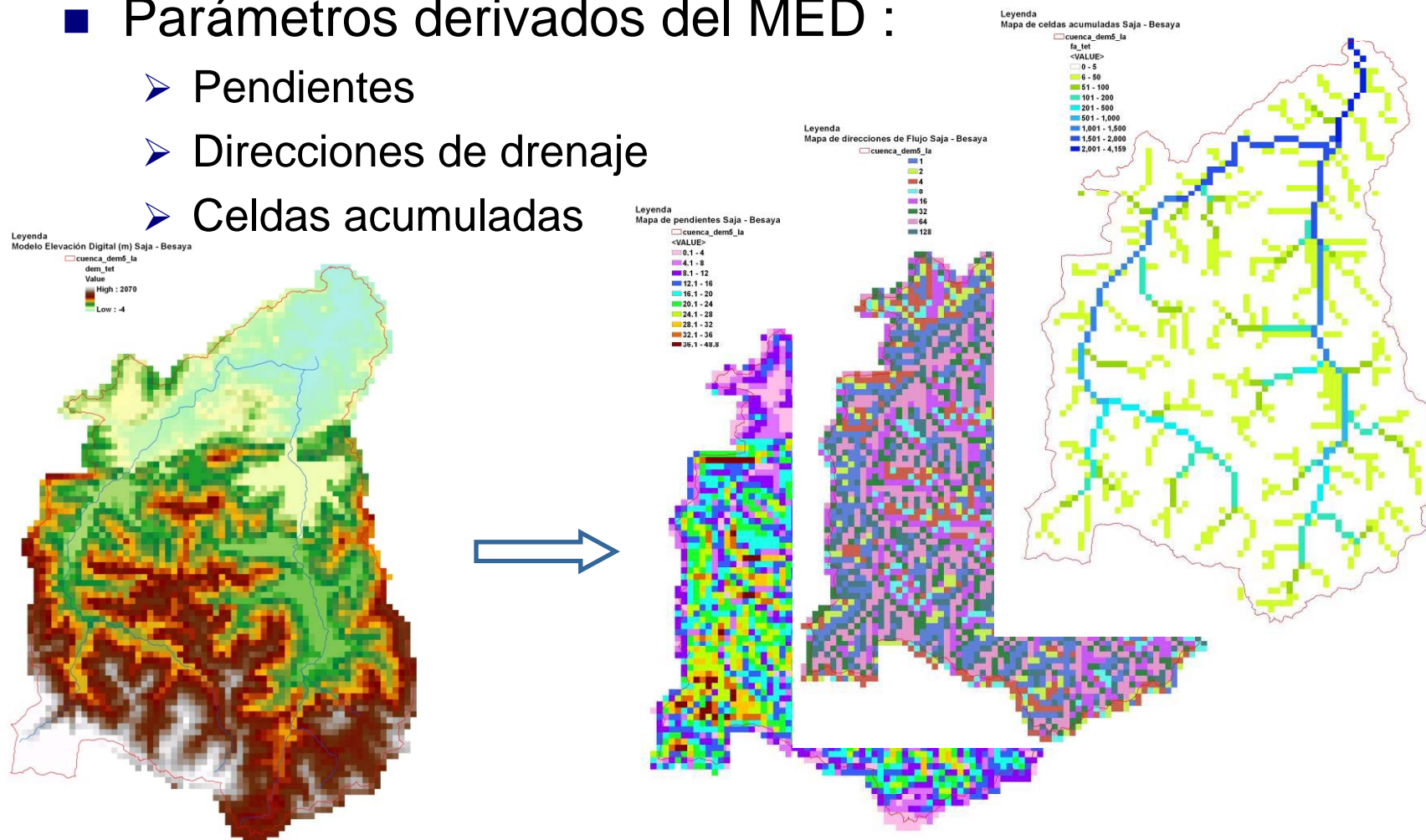


MED 500 m

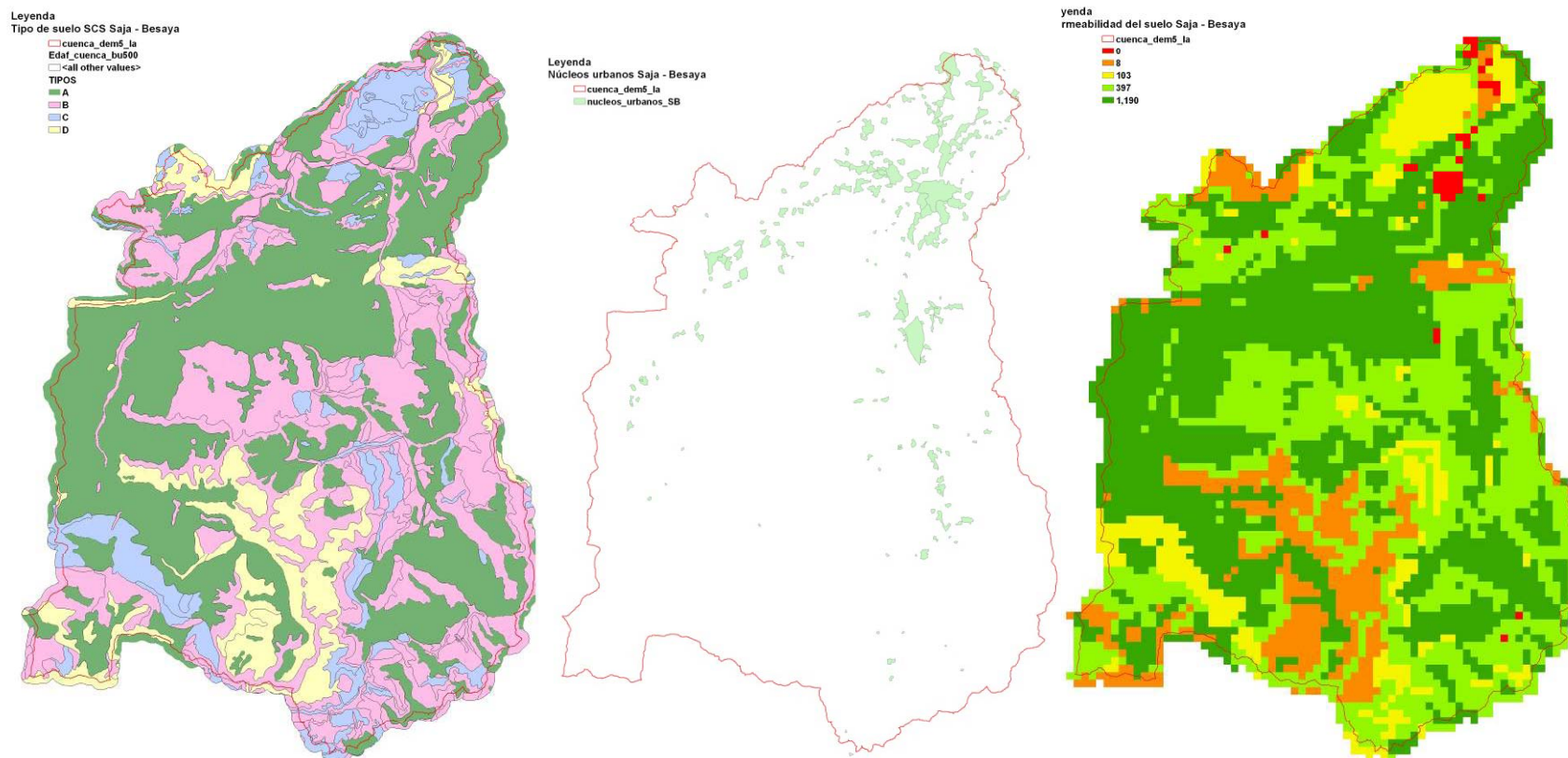


## ■ Parámetros derivados del MED :

- Pendientes
- Direcciones de drenaje
- Celdas acumuladas

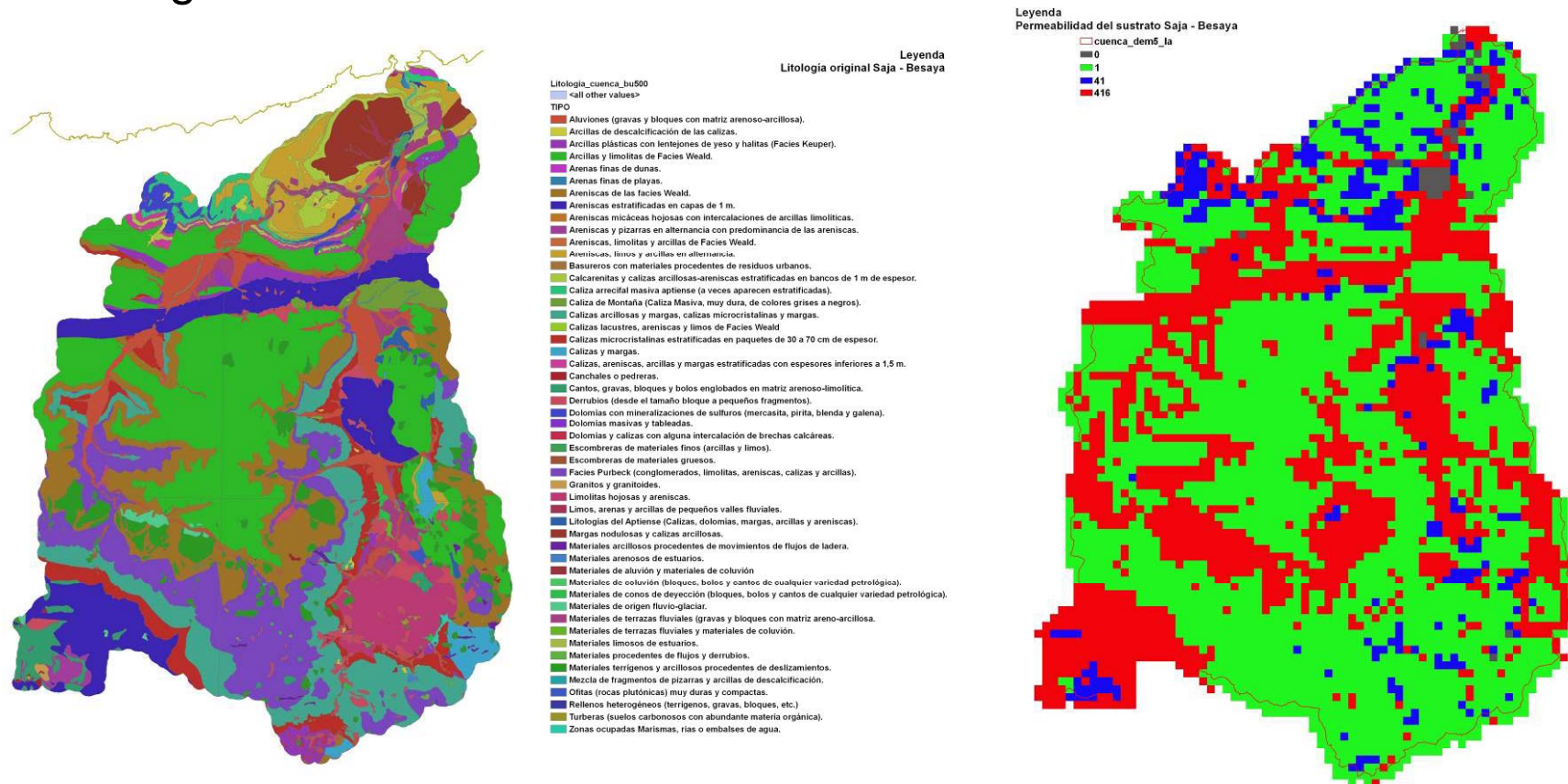


- Permeabilidad en superficie (a partir de mapa edafológico con clasificación de suelos del SCS)

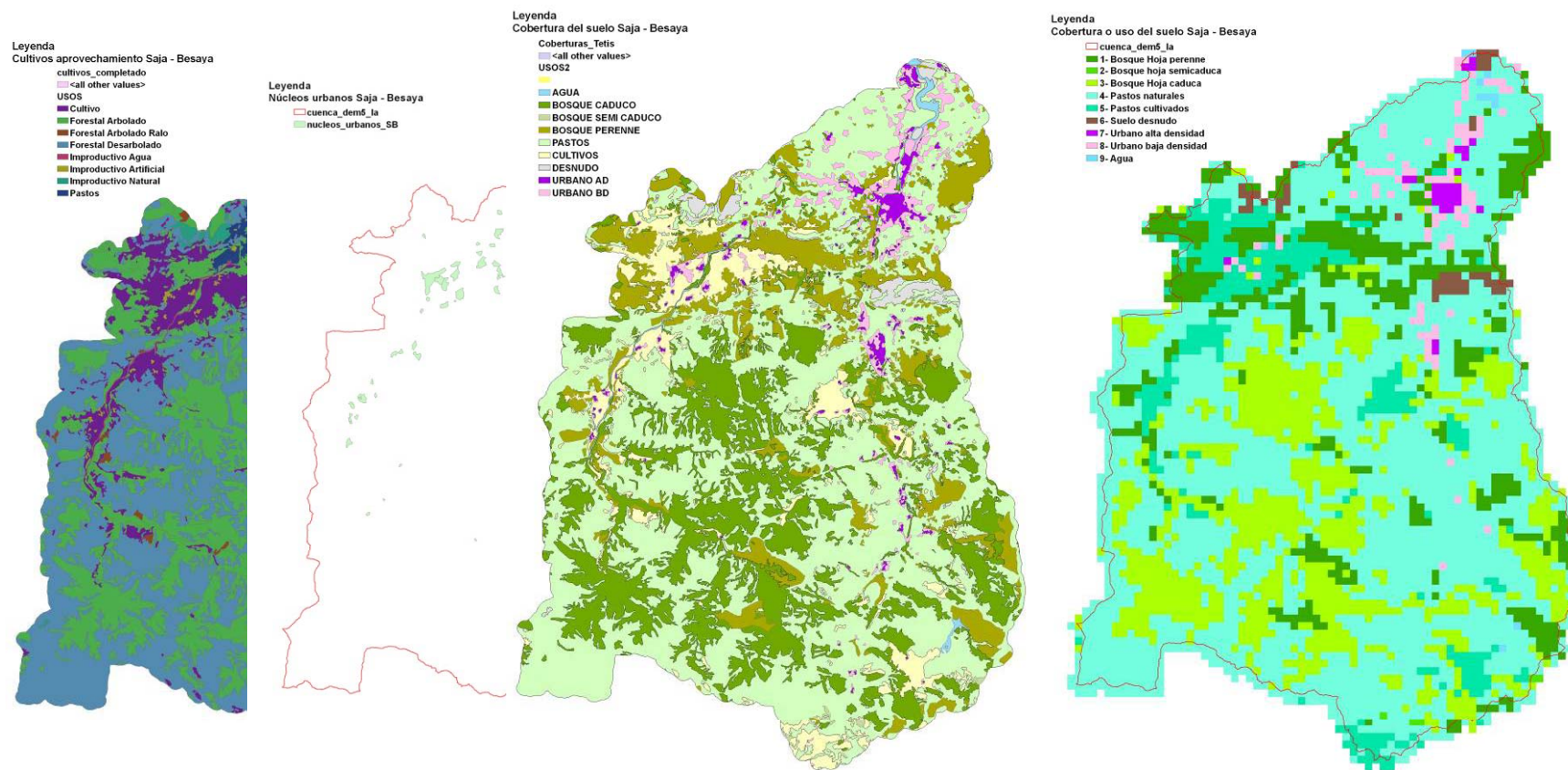




## ■ Estimación “grosera” de la permeabilidad profunda a partir del mapa litológico



- Tipologías de vegetación para la ET e interceptación:
  - A partir de mapa de aprovechamiento de cultivos y núcleos urbanos

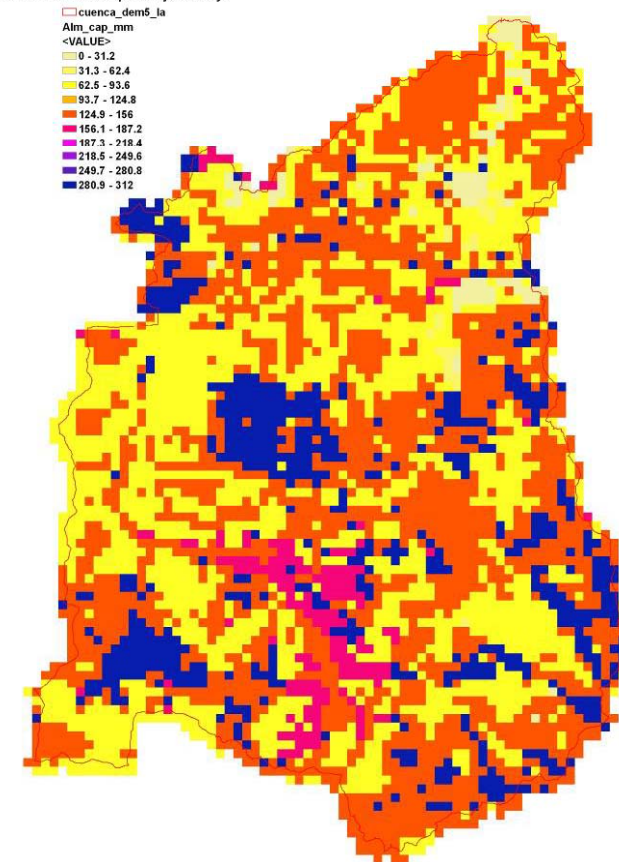




- Almacenamiento en superficie =  
intercepción + charcos
  - Intercepción =  $f(\text{Mapa de cubierta del suelo})$
  - Charcos =  $f(\text{Mapa de cubierta del suelo y mapa de pendientes})$
  
- Almacenamiento Capilar del suelo
  - Profundidad efectiva de raíces  $\times$   
(Capacidad de campo – P. marchitez)  

$\xrightarrow{\quad} f(\text{tipo de suelo}) \xleftarrow{\quad}$
  
- Almacenamiento estático
  - Suma de Almacenamiento en superficie  
y Almacenamiento estático

Leyenda  
Almacenamiento capilar Saja - Besaya



# Proceso de calibración

- Estimación de parámetros por comparación entre el valor observado y el simulado de alguna variable de estado
  - Tradicionalmente: el caudal en el punto de desagüe
- Evaluación del modelo:
  - Comparación gráfica
  - Funciones objetivos:

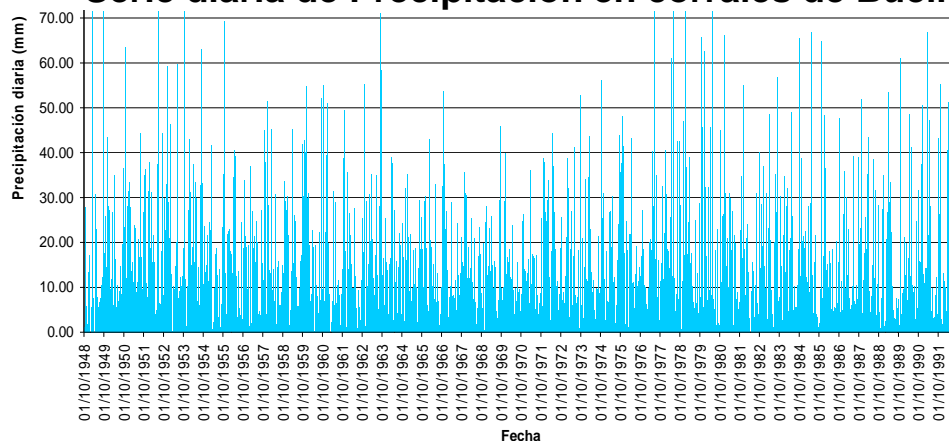
- Error de balance 
$$BE(\%) = \frac{\sum (s_i - Q_i)}{\sum Q_i} 100$$

- Error raíz-cuadrático medio (F.O. calib.) 
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - s_i)^2}$$

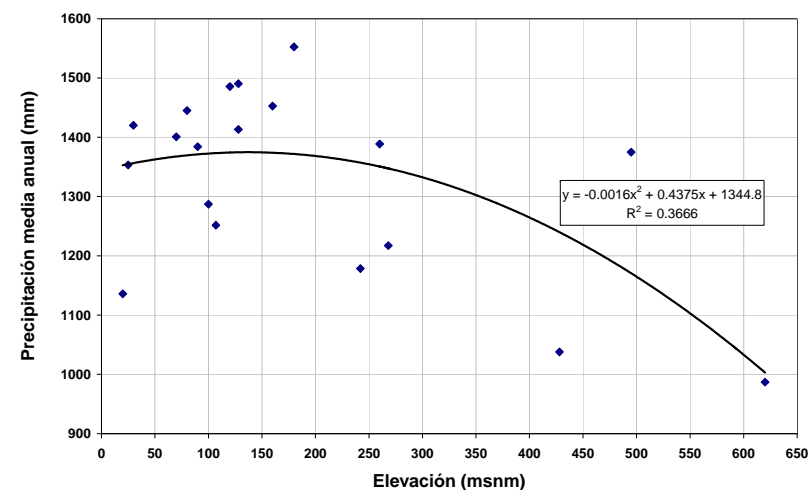
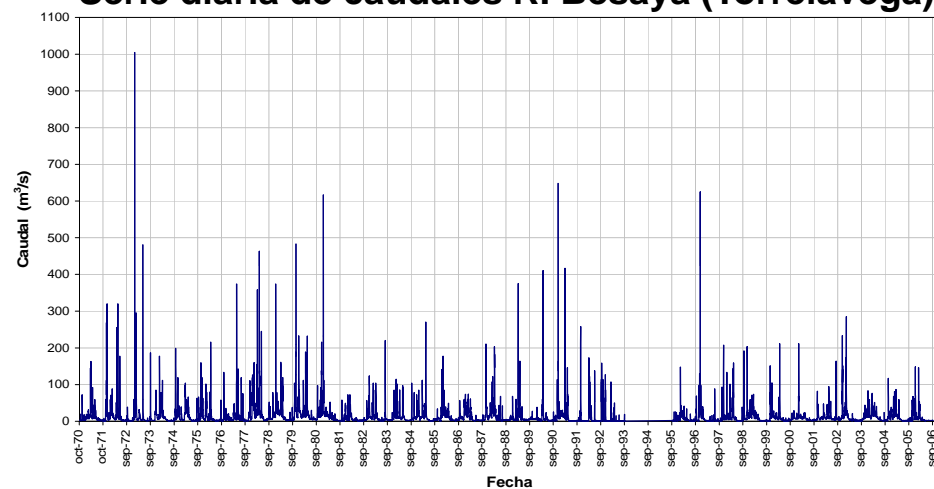
- Índice de Eficiencia (Nash-Sutcliffe) 
$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_i - s_i)^2}{\sum (Q_i - Q_m)^2}$$



## Serie diaria de Precipitación en corrales de Buelna



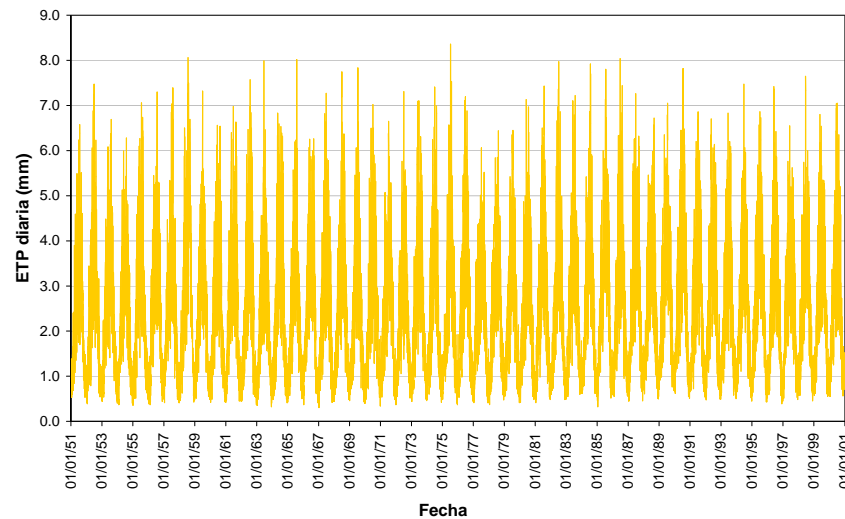
## Serie diaria de caudales R. Besaya (Torrelavega)



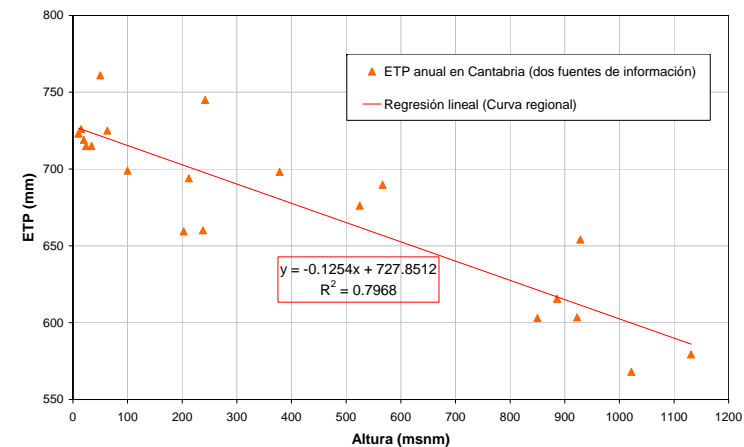
**Correlación entre la precipitación anual y la altitud de pluviómetros en la cuenca del Saja-Besaya**

## ■ Información de partida:

- Serie diaria de ETP en Aeropuerto de Sondika (Bilbao)
- ETP media anual y mensual en algunas estaciones de la región



**Serie diaria de ETP en Apto Sondika (Bilbao)**

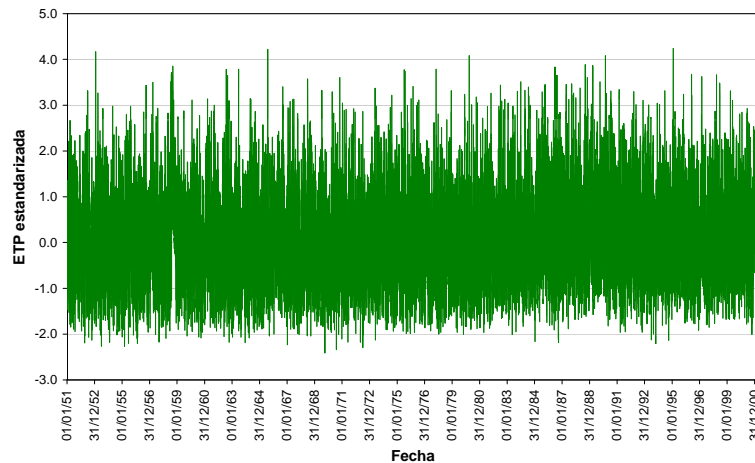


**Relación regional de ETP anual con la cota**

# Extrapolación de ETP a cuenca S-B (Resultados en 9 puntos de la cuenca)

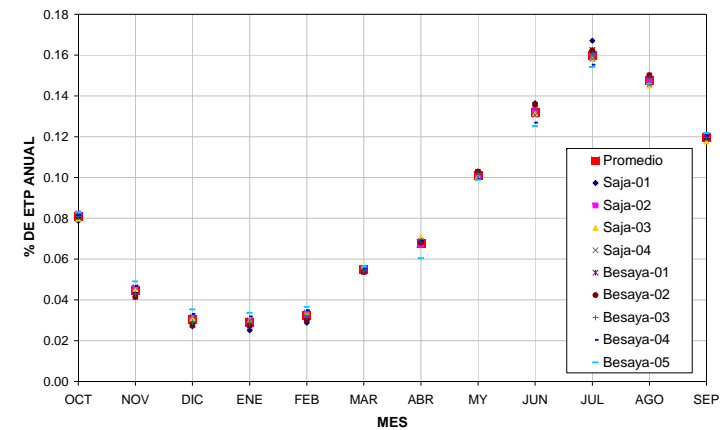
## Serie estandarizada Apto Sondika

$$Z_{(d,M)}^{Sondika} = \frac{\frac{ETP_{(d,M)}^{Sondika}}{\mu_M^{Sondika}} - 1}{\gamma_M^{Sondika}}$$

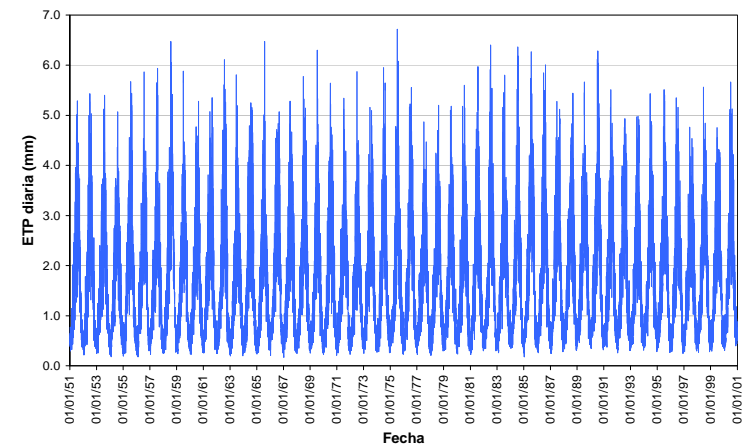


$$ETP_{(d,M)}^i = \left( Z_{(d,M)}^{Sondika} \cdot \gamma_M^{Sondika} + 1 \right) \cdot \mu_M^i$$

## Ciclo anual de ETP estimado en 9 puntos interiores distribuidos en la cuenca

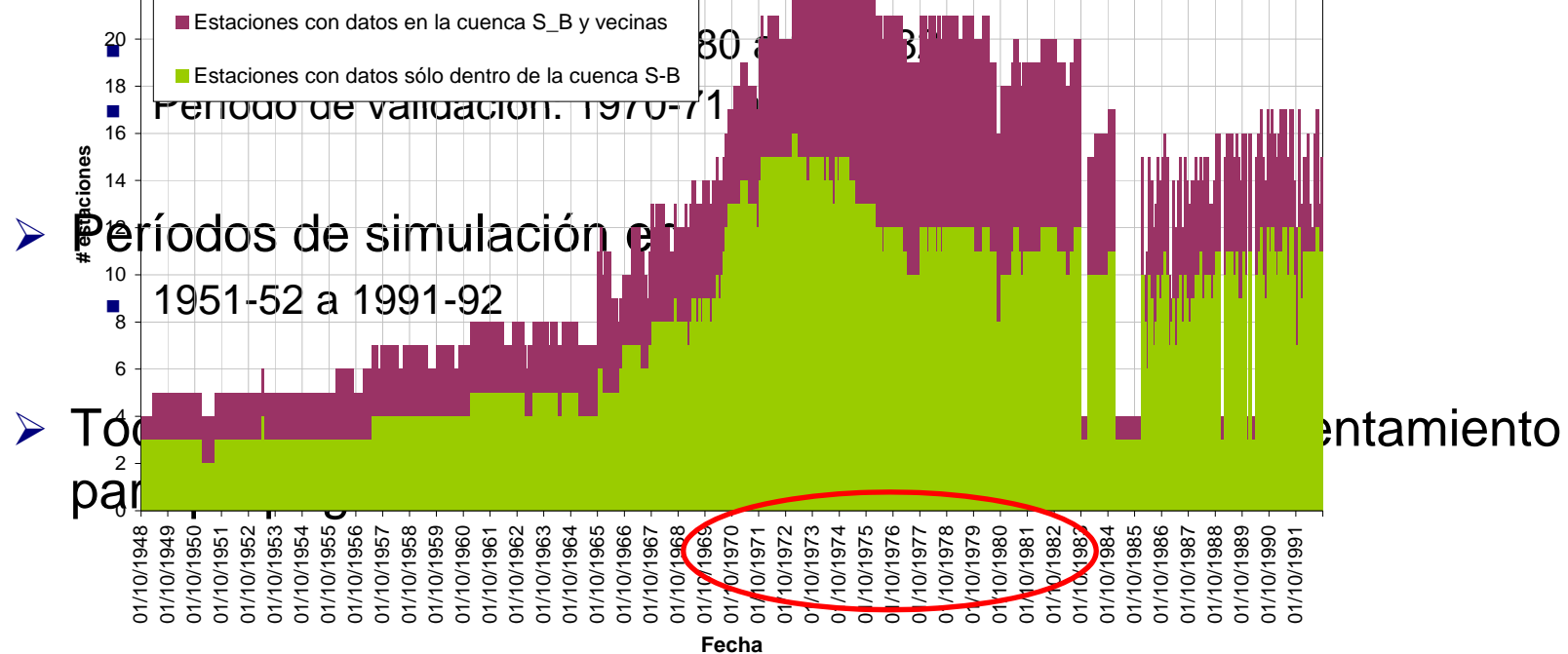


## ETP en una subcuenca del R. Besaya



## ■ Períodos de calibración y validación teniendo en cuenta:

- Número de estaciones pluviométricas disponibles
- Comienzo y final de las series de Q, P y ETP (período común)
- Puesta en marcha de trasvase de agua del Ebro a finales de 1982



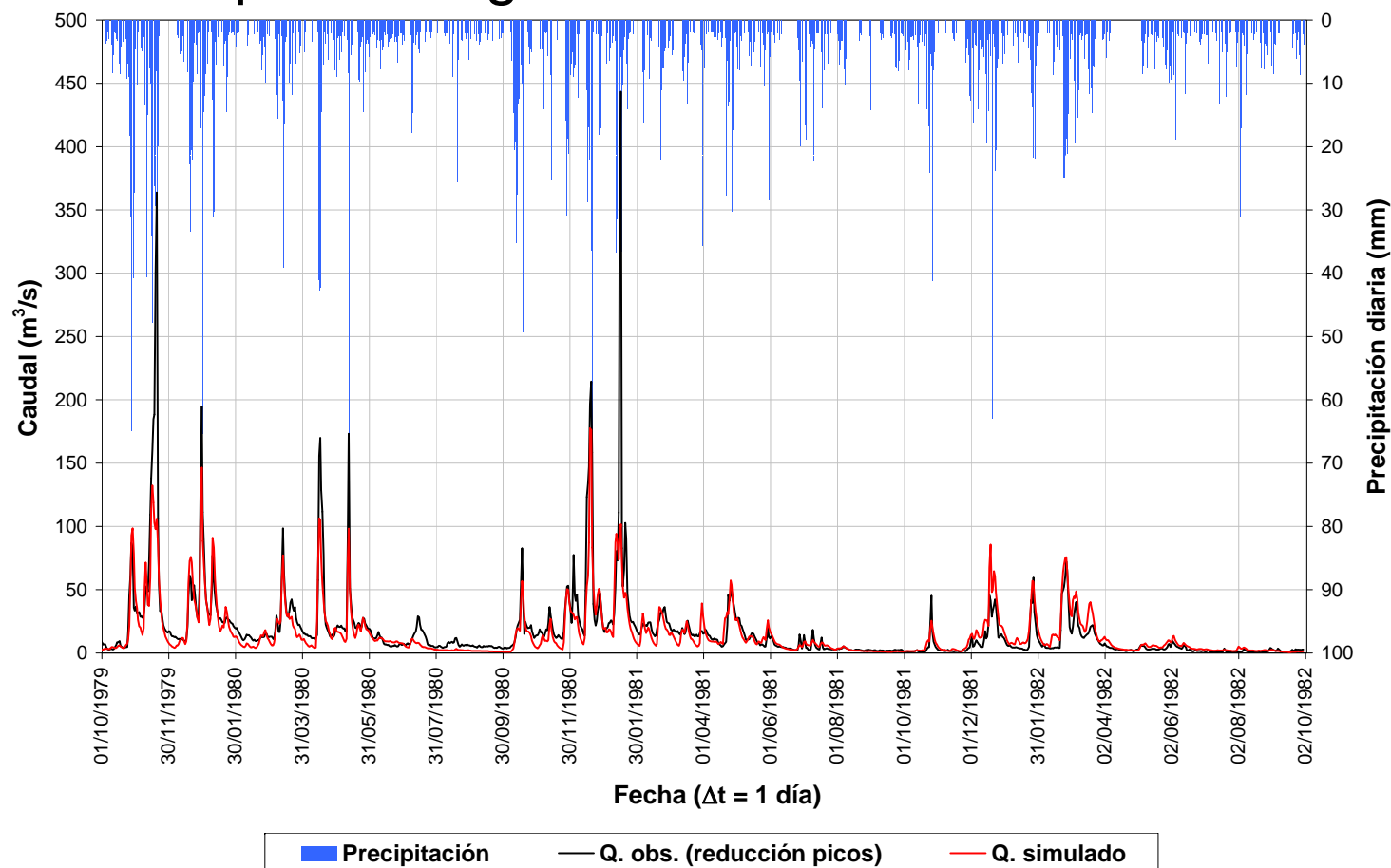
# Calibración modelo diario

- Calibración automática de los F.C. (Francés et al., 2007)
  - Eliminando 2 picos no explicables por la precipitación observada
  - Proceso iterativo entre los modelos diario y horario:
    - Optimización inicial de parámetros en modelo diario
    - Ajuste del F.C. de la velocidad en cauces en modelo horario

**Rango de variación, valores iniciales para la optimización automática y valor calibrado**

Factor corrector	Mínimo	Máximo	Valor Inicial	Valor calibrado
R1 – Almacenamiento estático	1.1	1.8	1.5	1.428
R2 – Evapotranspiración	1.1	1.8	1.5	1.364
R3 – Infiltración	0.001	0.1	0.007	0.0272
<b>R4 – Escorrentia directa</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-	-
R5 – Percolación	0.0001	0.1	0.002	0.00288
<b>R6 – Flujo subsuperficial</b>	<b>20</b>	<b>100</b>	<b>60</b>	<b>120.14</b>
R7 – Pérdidas subterráneas	0	0	-	-
<b>R8 – Flujo base</b>	<b>1</b>	<b>30</b>	<b>5</b>	<b>8.21</b>
<b>R9 – Velocidad del flujo</b>	<b>0.6</b>	<b>0.6</b>	-	-
Coeficiente $\beta$	0.003	0.006	0.004	0.00431

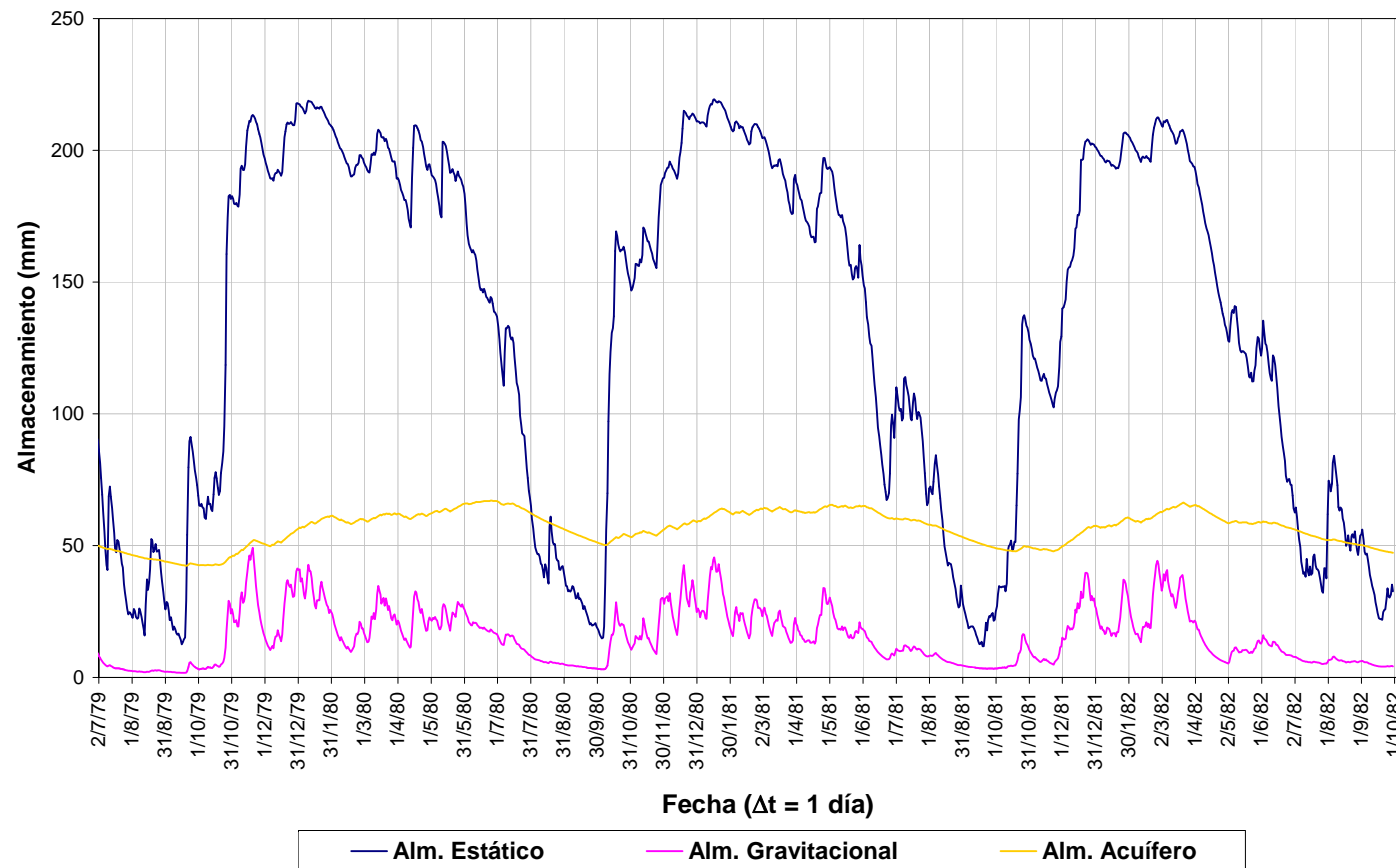
## ■ Comparación gráfica e índices estadísticos:



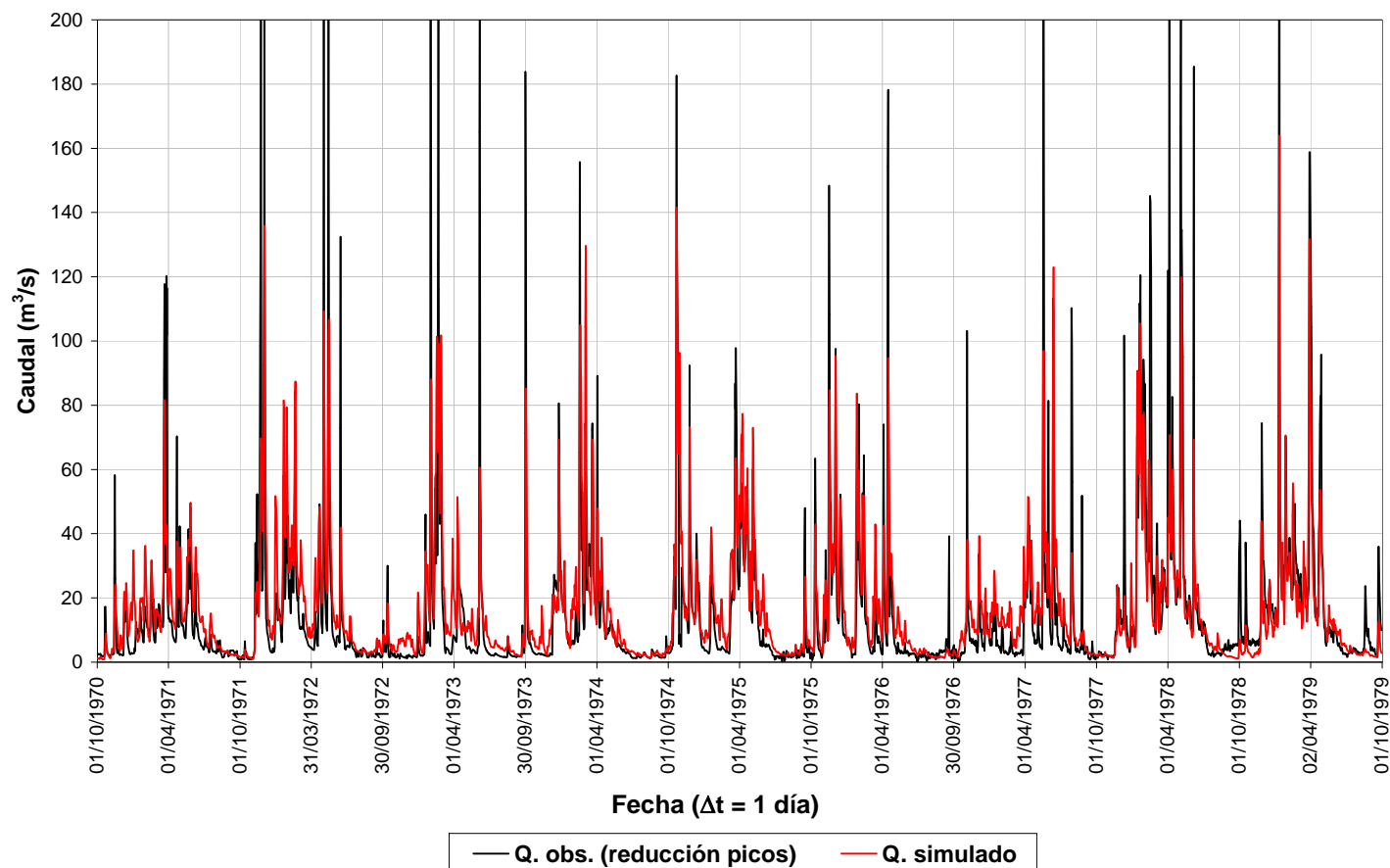
Parámetro	Valor
RMSE	11.1
NSE	0.81
E. Vol. (%)	4.6



## ■ Estacionariedad de almacenamientos



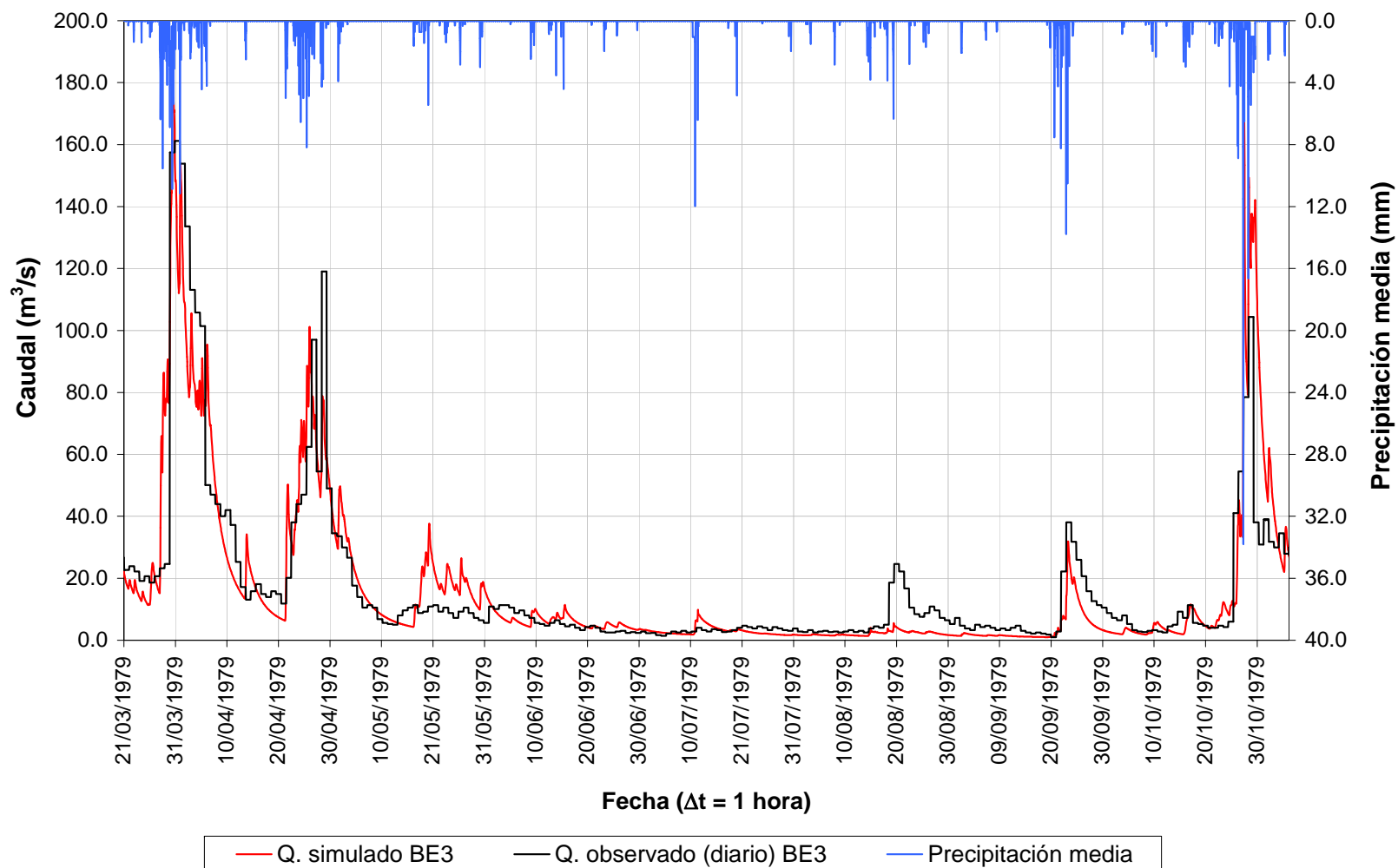
## ■ Comparación gráfica e índices estadísticos:



Parámetro	Valor
RMSE	14.8
NSE	0.65
E. Vol. (%)	9.87

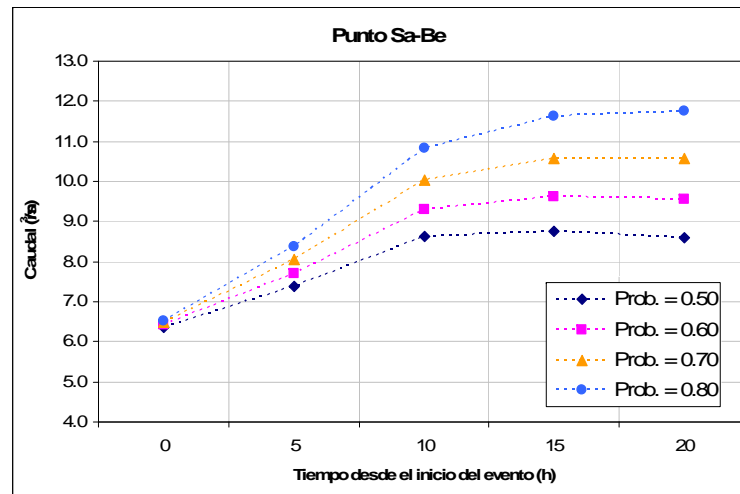
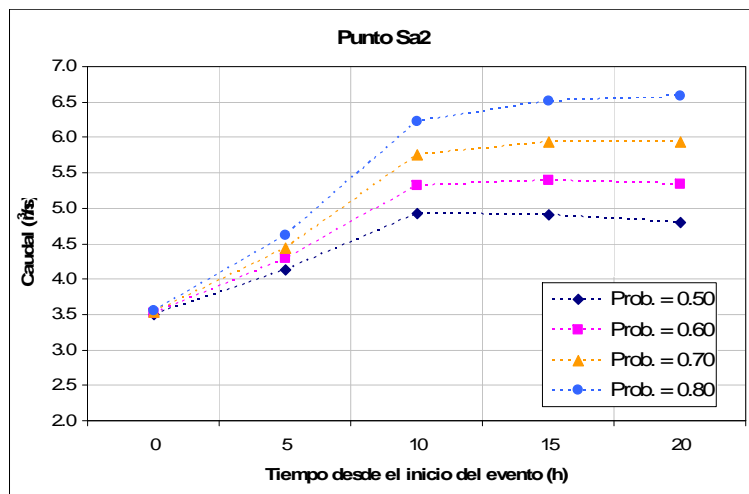
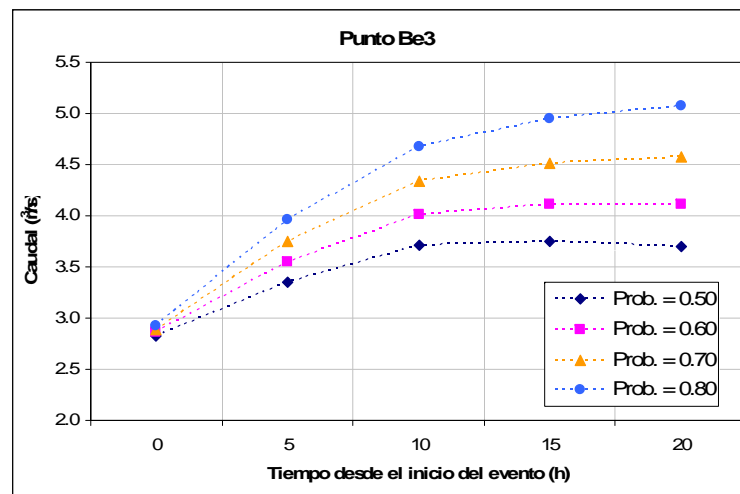
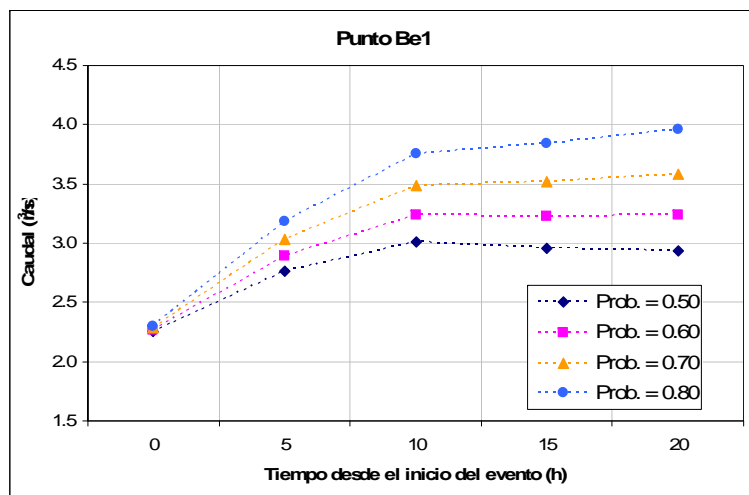
- Períodos de calibración y validación (modelo diario)
  - Período de simulación: 1951-52 a 1982-83
- 3 meses de calentamiento
- Función objetivo de calibración: RMSE medio diario
  - Aunque en el modelo horario se siguió un procedimiento riguroso de calibración siguiendo el criterio anterior, no tiene sentido hablar de ajustes dado que el caudal observado es diario.
  - El modelo tiende a sobreestimar los caudales de estiaje, por lo que se recomienda utilizar los simulados en el modelo diario.

# Resultados modelo horario



# Análisis estadístico de eventos ocurridos en época de estiaje en el período simulado

- Separación de todos los eventos de crecida en puntos de simulación
  - Inicio de evento: criterio de incremento de caudal
  - Finalización de evento: cuando transcurren 14 horas consecutivas sin lluvia (duración mínima 20 horas)
- En cada evento se establece como caudal inicial el caudal diario del día anterior (modelo diario)
  - Con este caudal se corrigen los caudales del evento
- Análisis estadístico del caudal al inicio del evento y de los caudales transcurridas 5, 10, 15 y 20 horas.
  - Magnitud de la tormenta asociada -en términos de probabilidad de no excedencia- para comparar con eventos sintéticos.





# Conclusiones

- En este trabajo se presenta la aplicación del modelo hidrológico distribuido Tetis para generar series de caudales a diferentes escalas temporales y en diversos puntos de interés de la cuenca de estudio.
- Debido a la falta de datos de caudal con alta resolución temporal, se han implementado dos versiones del modelo para la cuenca Saja-Besaya: diaria y horaria.
- El modelo diario presenta excelentes resultados, no obstante la incertidumbre en algunas fuentes de información base (parámetros del suelo, la ETP).
- El modelo horario reproduce adecuadamente los hidrogramas de respuesta, no obstante la pobre distribución espacial de las precipitaciones que fueron reconstruidas previamente a esta escala temporal.
- La caracterización estadística de los eventos simulados permite estimar un orden de magnitud del caudal esperado para diferentes tiempos transcurridos desde el comienzo de la tormenta en función de su magnitud, expresada en términos de probabilidad de no excedencia.