

# ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO TETIS CON INFORMACIÓN ESTÁNDAR INCLUYENDO PROCESOS KÁRSTICOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO MIJARES

Jaime Gaona García

TFM Máster de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Tutor: Félix Francés García

Septiembre 2015



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

mihma  
máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente

## ÍNDICE

1. Introducción
2. Modelación hidrológica distribuida
3. Caso de estudio
4. Información hidrometeorológica
5. Estimación de parámetros para la modelación distribuida de la cuenca del Alto Mijares
6. Calibración y validación del modelo
7. Conclusiones

# I - INTRODUCCIÓN

## Objetivo

### Objetivo general:

**Simulación de crecidas**

**A escala temporal diaria**

**Simulación continua**

## Objetivo

**Objetivo específicos: ≠ datos pluviometría y karst**

**Implementación  
del modelo hidrológico distribuido TETIS  
con información estándar  
incluyendo procesos kársticos  
en la cuenca alta del Río Mijares.**

## Justificación del estudio

**Carretera Cirat-Montanejos (Castellón). 1967**  
Socavamiento de la ladera por zapa. Avenida del río Mijares



**Puente de Ribesalbes (Castellón). 1967**  
Daños ocasionados por la crecida del 23 de octubre



## Justificación del estudio

### Análisis de registros hidrometeorológicos

- Escasez de registros pluviométricos.
  - **AEMET:** datos inaccesibles por política de datos restringidos
  - **SAIH:** datos cincominutales, desde **1990-actualidad** (baja densidad de estaciones)



**Restringe el periodo de simulación a 1990-actualidad**

- **Spain02:** datos interpolados, versión 2 1950-2008  
versión 4 1980-2008



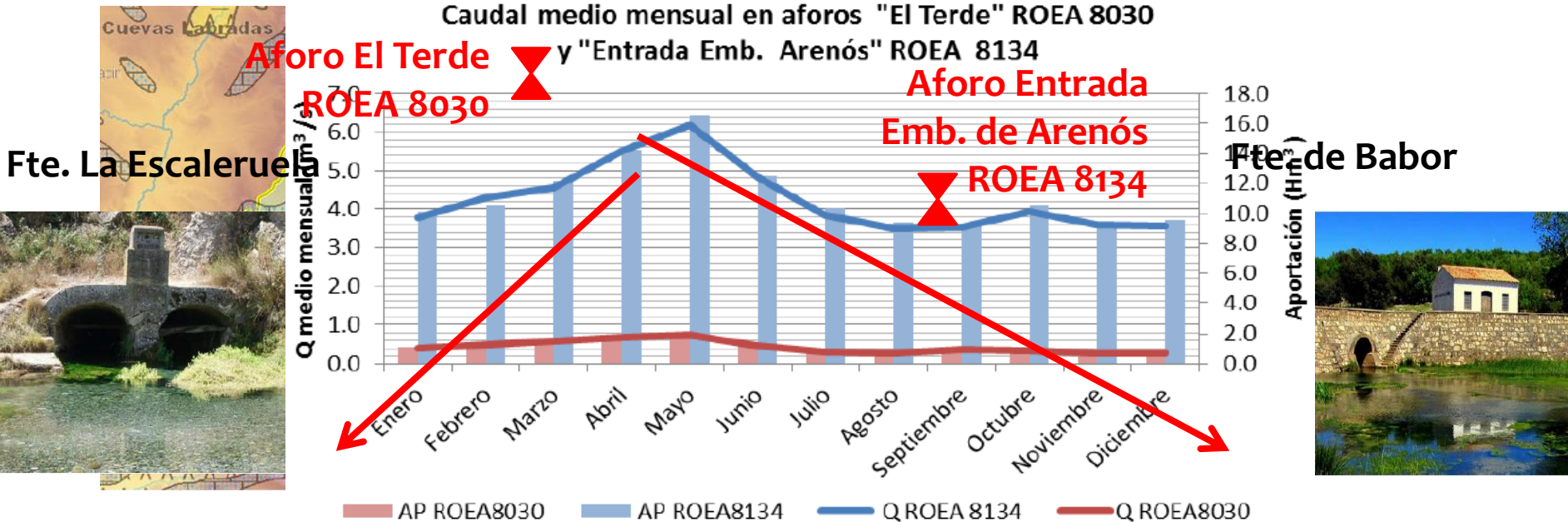
**Restringe el periodo de simulación hasta 2008**  
(para permitir la comparación con la serie SAIH)

**Permite la extensión de validación a 1980 si se adopta input Spain02**

## Justificación del estudio

### Compleja dinámica hidrológica de la cuenca

- Influencia de fenómenos kársticos en la descarga concentrada de aportaciones en manantiales.



## TETIS

### Formulación del modelo

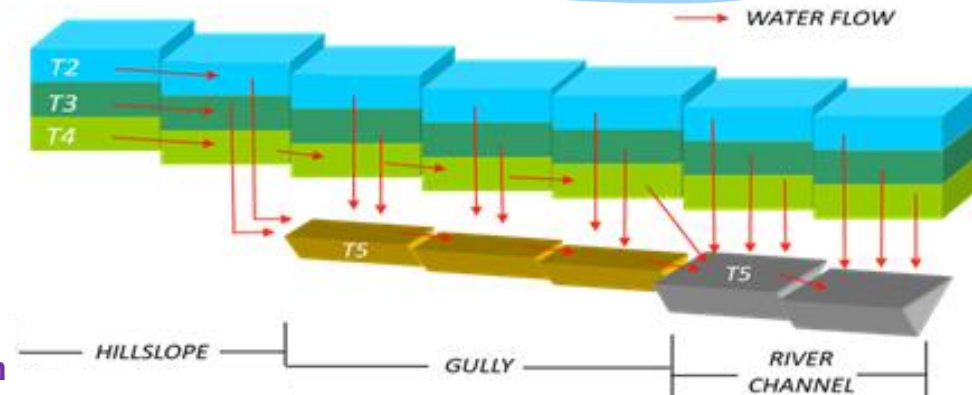
- El creciente uso y generación de datos distribuidos de alta resolución espacial y temporal y la existencia de modelos distribuidos más completos, impulsan y facilitan simular los procesos naturales.
- El modelo distribuido TETIS se aplica aquí para no sólo para la simulación de los fenómenos de eventos extremos y simulación continua, sino también para simular fenómenos complejos: Karst.
- **Definición de TETIS** : Estructura separada de parámetros: parámetros medios de la cuenca multiplicados por factores correctores que son los que se calibran.



# II – MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON TETIS

## TETIS

**TETIS en configuración normal:**  
las áreas umbrales determinan el paso de flujo desde tanques de ladera a cárcava y cauce.



**TETIS en configuración de Karst presenta cambios estructurales en tanques y distribución de flujos:**

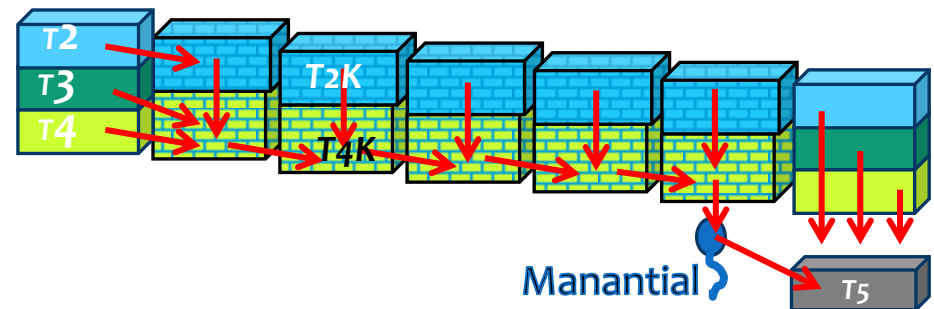
Mapa de área del Karst (zona de recarga)

+

Localización de los manantiales

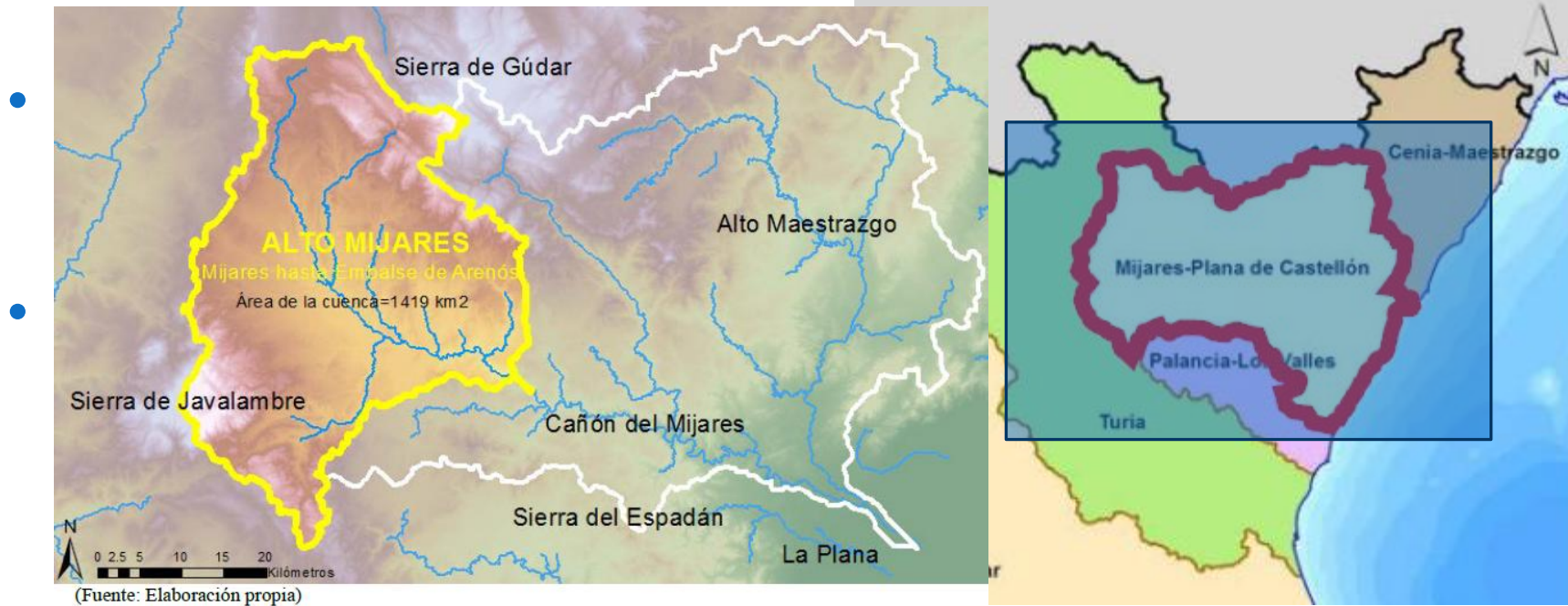
Definen dónde el flujo acumulado en acuífero es descargado en cauces:

(en las zonas definidas como Karst no hay flujos desde capas superiores del suelo a cárcava o cauce porque todo se deriva con preferencia al tanque 4 (flujo base).



## Área de estudio

### La cuenca



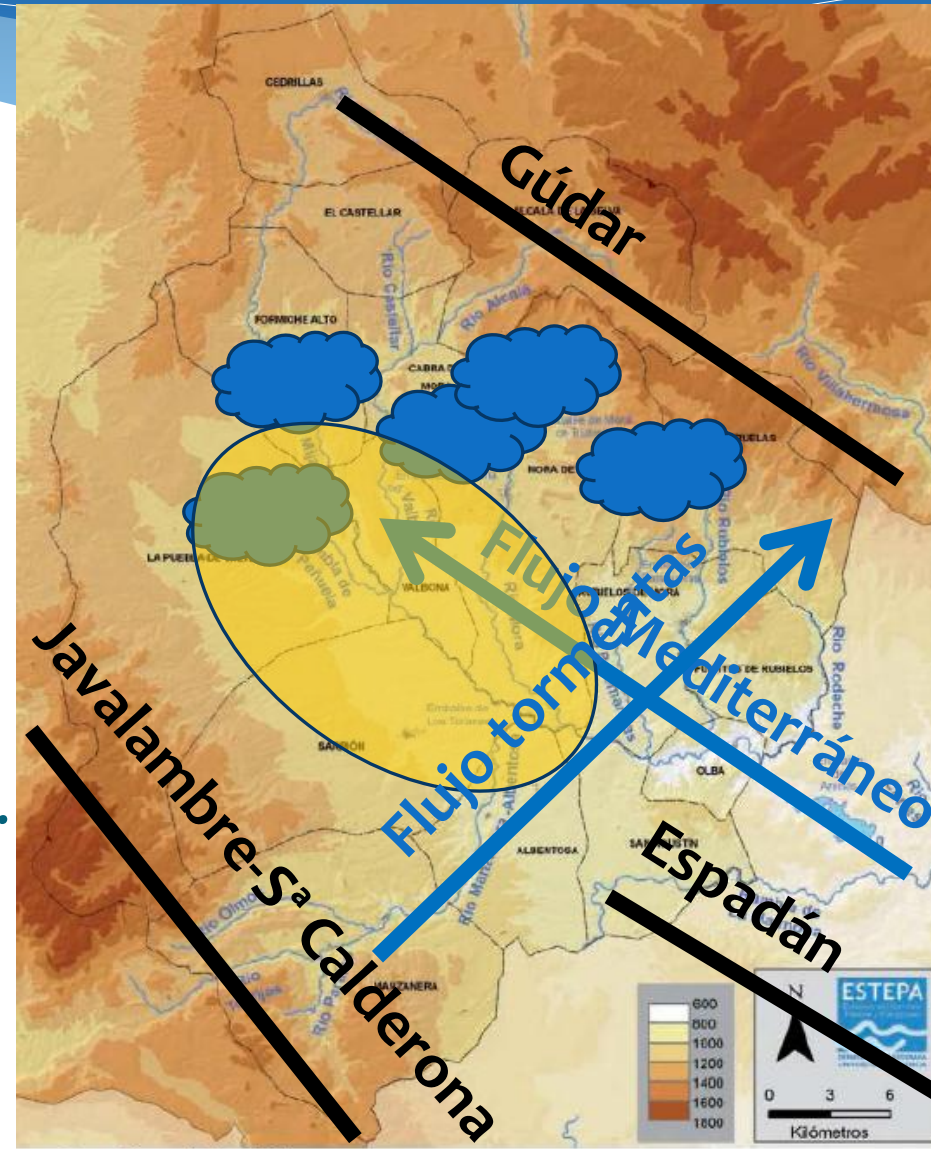
### Delimitación del área de estudio

- **Cuenca Alta del Mijares hasta Emb. Arenós.**

## Área de estudio

### Caracterización topográfica

- Gran altitud media: continentalidad: rango  $T^a$ , humedad ambiental, ETo, nieve...
- Relieves en dirección NO-SE: sin barrera topográfica a lluvias de Mediterráneas. Favorece actividad tormentosa.
- Amplia depresión de Sarrión: poco desnivel en cuenca alta, mayor pendiente del Mijares desde Cañones de Olba.



(Fuente: (Hermosilla Pla, 2011))

# III – CASO DE ESTUDIO: ALTO MIJARES

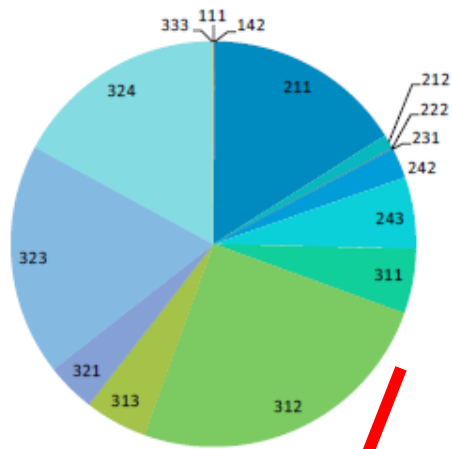
## Área de estudio



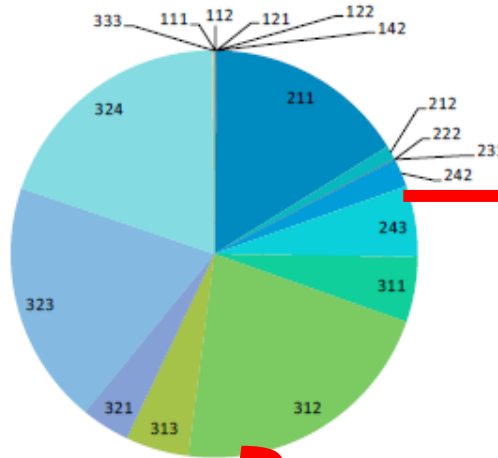
# III – CASO DE ESTUDIO: ALTO MIJARES

## Área de estudio

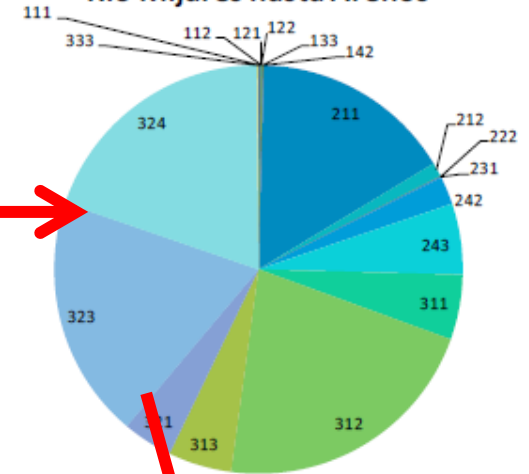
Usos del suelo Corine 1990  
Rio Mijares hasta Arenós



Usos del suelo Corine 2000  
Rio Mijares hasta Arenós

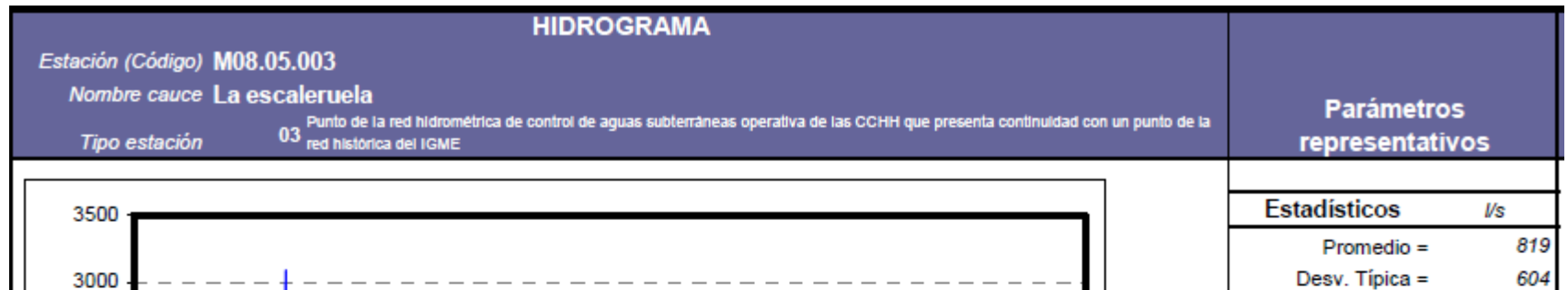


Usos del suelo Corine 2006  
Rio Mijares hasta Arenós

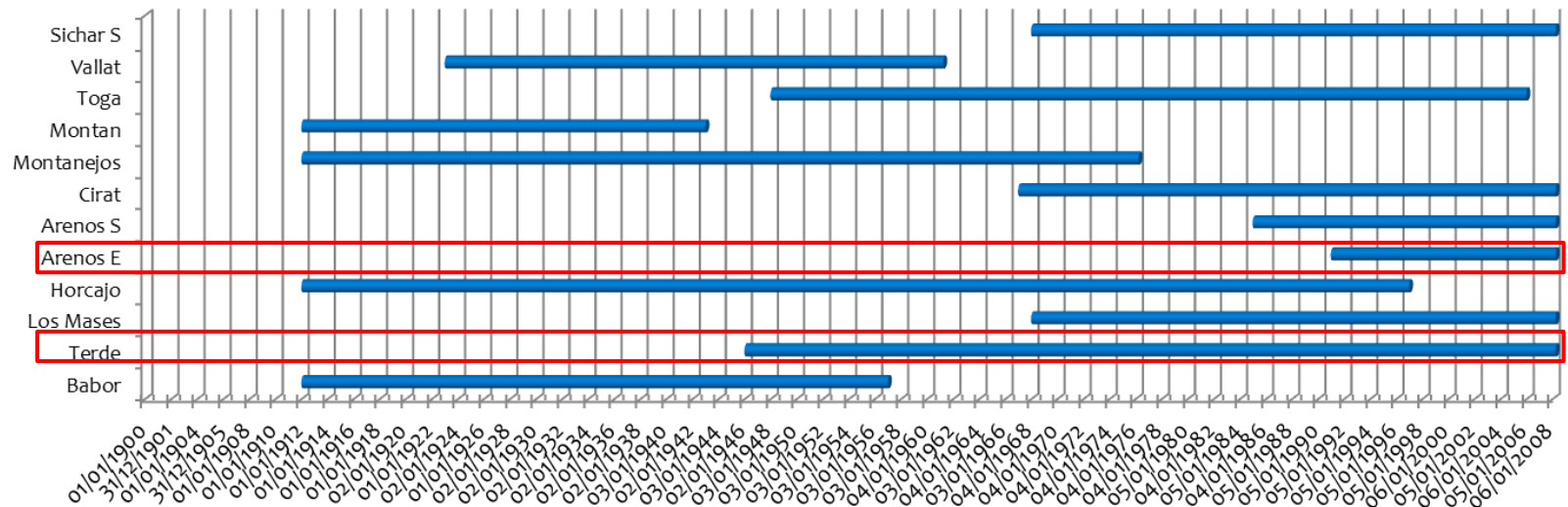


# IV – INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

## Hidrología

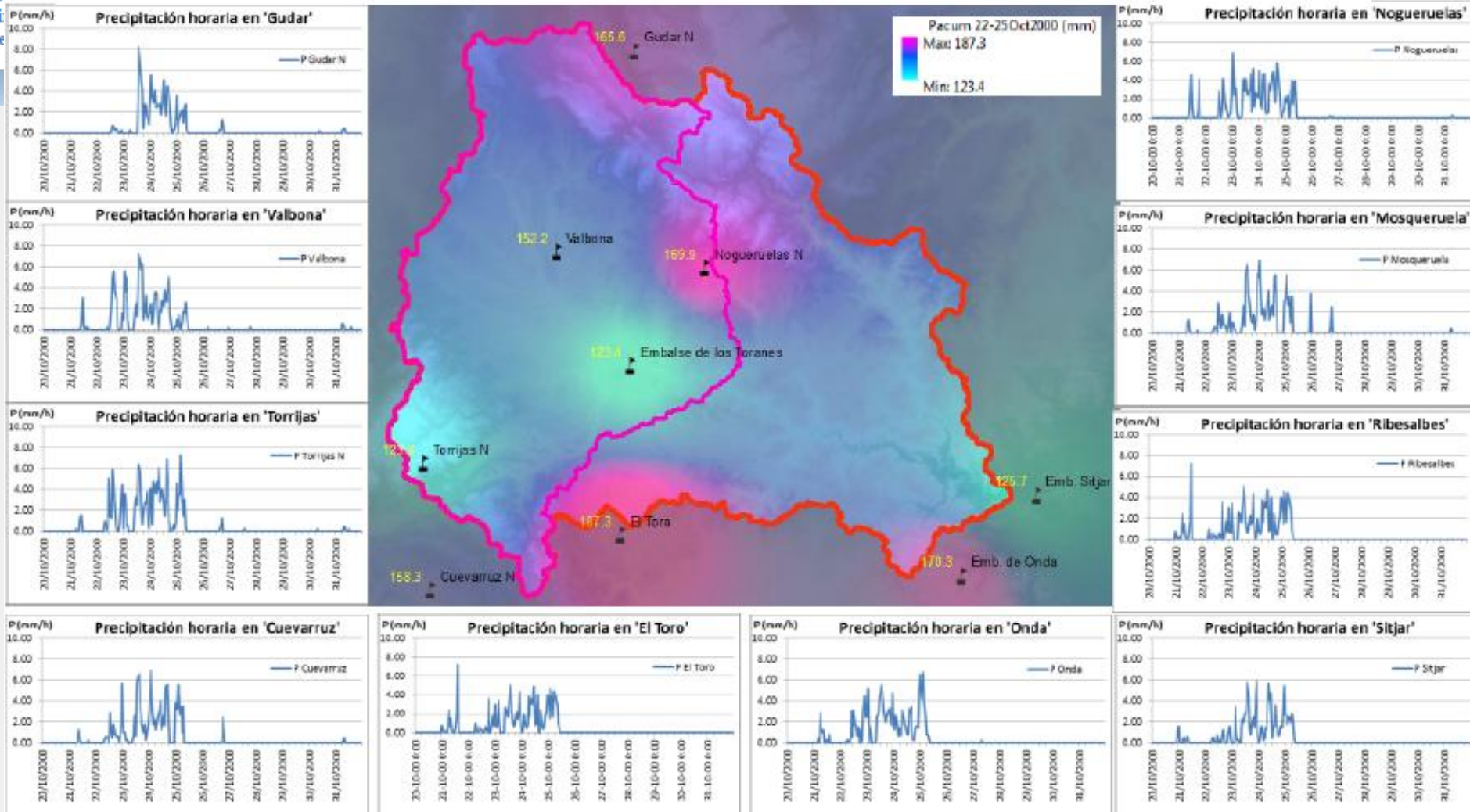


### Disponibilidad de datos foronómicos en la cuenca alta del Mijares



# IV – INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

Gráfica 4.38: Distribución espacial de la precipitación acumulada en el episodio del 24 de Octubre del 2000.

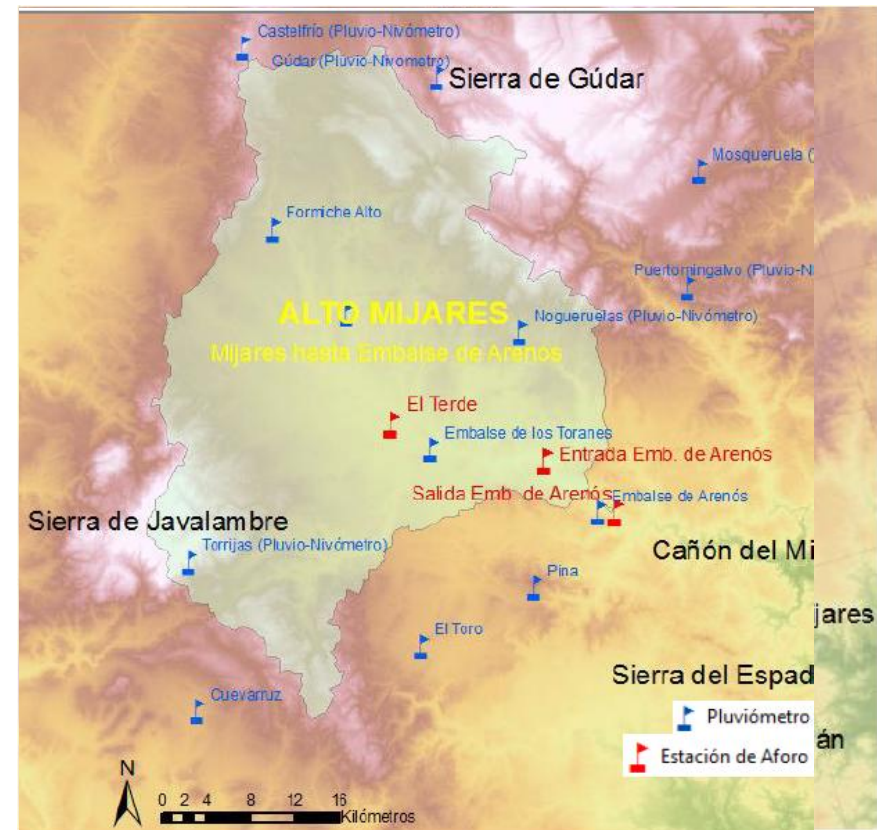


## Aptitud de los datos

### Análisis de series pluviométricas:

#### Densidad:

- SAIH: (1est/>150km<sup>2</sup>).
- Spain02V2: malla gruesa de datos interpolados, con densidad similar a SAIH (1est/150km<sup>2</sup>)
- Spain02V4: malla fina que considera efectos orográficos, la mejor representación de la serie de Q observados, densidad (1est/<100km<sup>2</sup>)



(Fuente: Elaboración propia)



## Aptitud de los datos

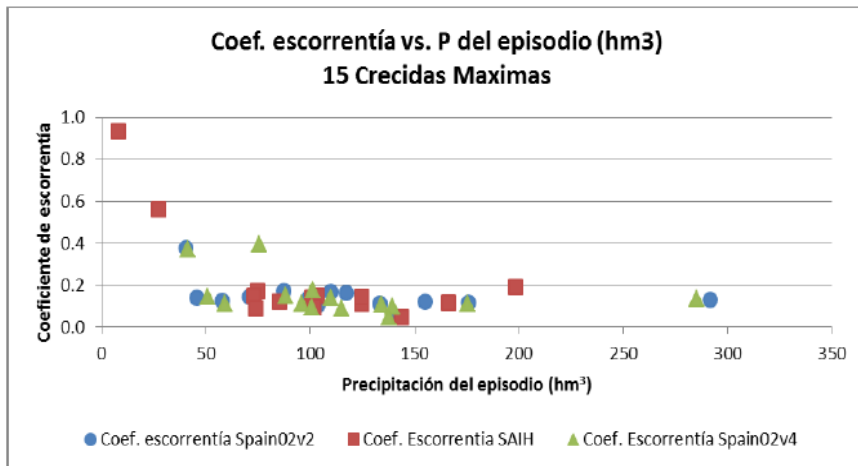
### Análisis de series pluviométricas:

#### Análisis Coef. Escorrentía y precipitación:

Mayor variabilidad de la serie SAIH: en crecidas precedidas de lluvias

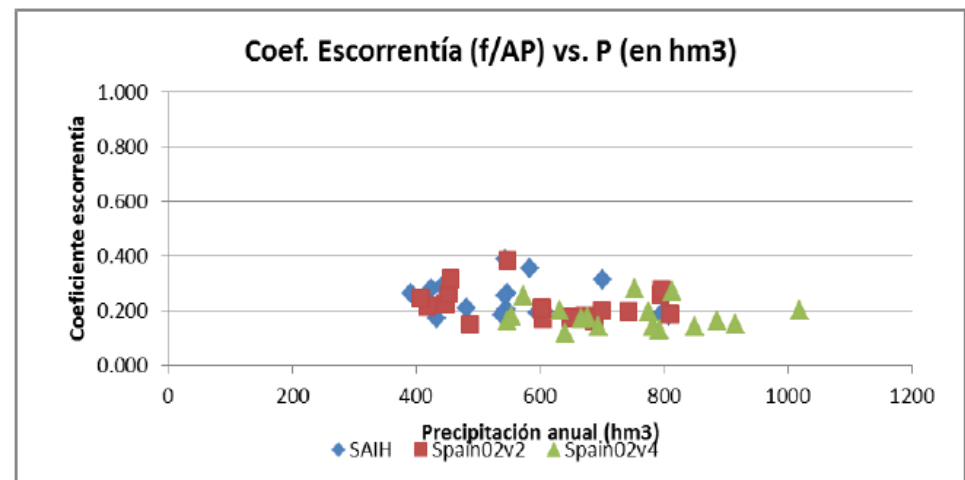
Menor relación Coef. Escorrentía-Precipitación: debido a menor densidad

Gráfica 4.39: Gráfica de coef. de escorrentía en el aforo de Entrada de Arenós ROEA 8134 frente a precipitación media de la cuenca en los 15 episodios de mayor crecida, series SAIH, spain02v2 y Spain02v4 1991-2008.



(Fuente: Elaboración propia).

Gráfica 4.41: Gráfica de coef. de escorrentía en el aforo de Entrada de Arenós ROEA 8134 frente a precipitación anual SAIH, spain02v2 y Spain02v4 1991-2008.



(Fuente: Elaboración propia).

## Procesado

### Mapas derivados del MDT

- Mapas básicos input de TETIS

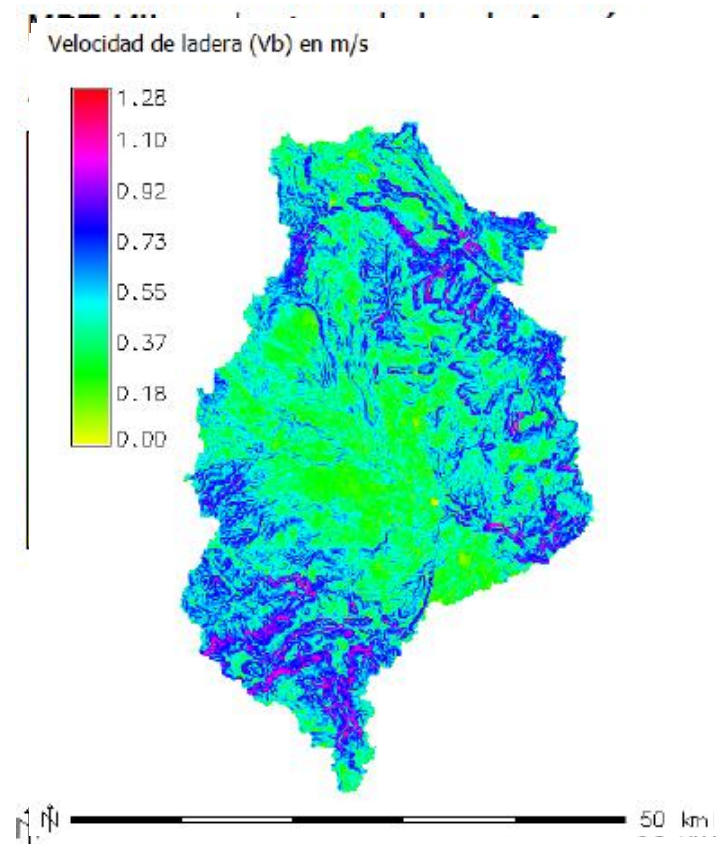
**MDT:** celdas 100x100  
con corrección de red de drenaje  
mediante líneas azules

Direcciones de drenaje

Celdas drenantes acumuladas

Velocidad de flujo en ladera

$$v_t = 1.4142 * \sqrt{\text{pendiente} (m/m)}$$



## Procesado

### Mapas derivados de la información de suelo

- **Características físicas del suelo:** definen las características hidrogeológicas:
  - Ks, proviene del mapa Ks de la ESDB, necesario transformar a 100x100m celda.
  - Kp, a partir de mapas del IGME, aplicando valores a la caract. cualitativa.

- **Almacenamiento estático definido mediante:**

$$H_u = Alm. sup. + AWC.TOP * \min(Prof.raíces; ROO)$$

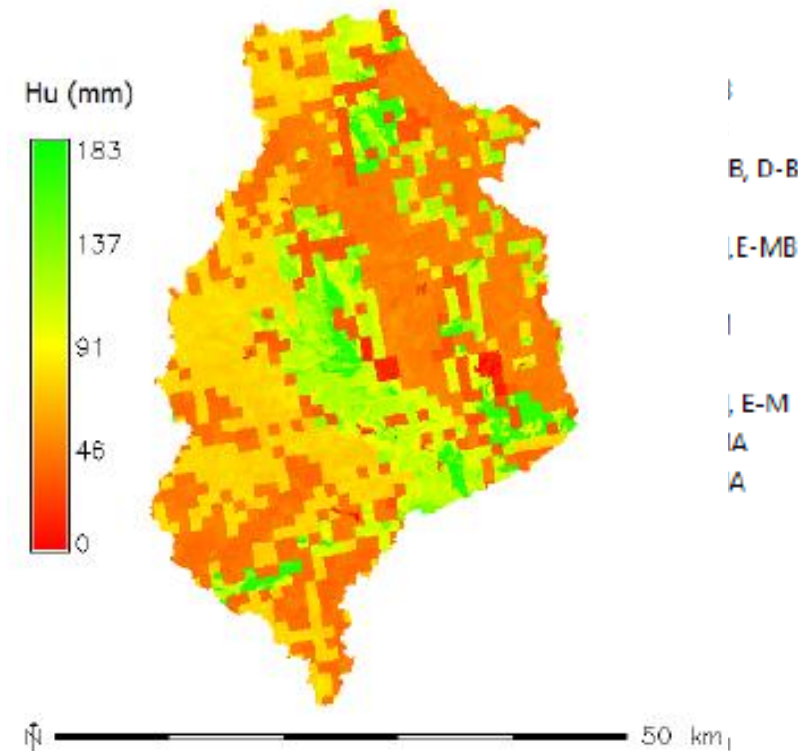
#### Tipo de uso del suelo:

- Almacenamiento superficial
- Profundidad de raíces de la veg.

#### Características físicas del suelo:

- Mapa AWC\_TOP de la ESDB
- Profundidad de obstáculo de raíces ROO\_ESDB (necesario transformar ambos a 100x100m)

Almacenamiento estático Hu:  
Cuenca del Río Mijares hasta Arenós



## Datos generales :

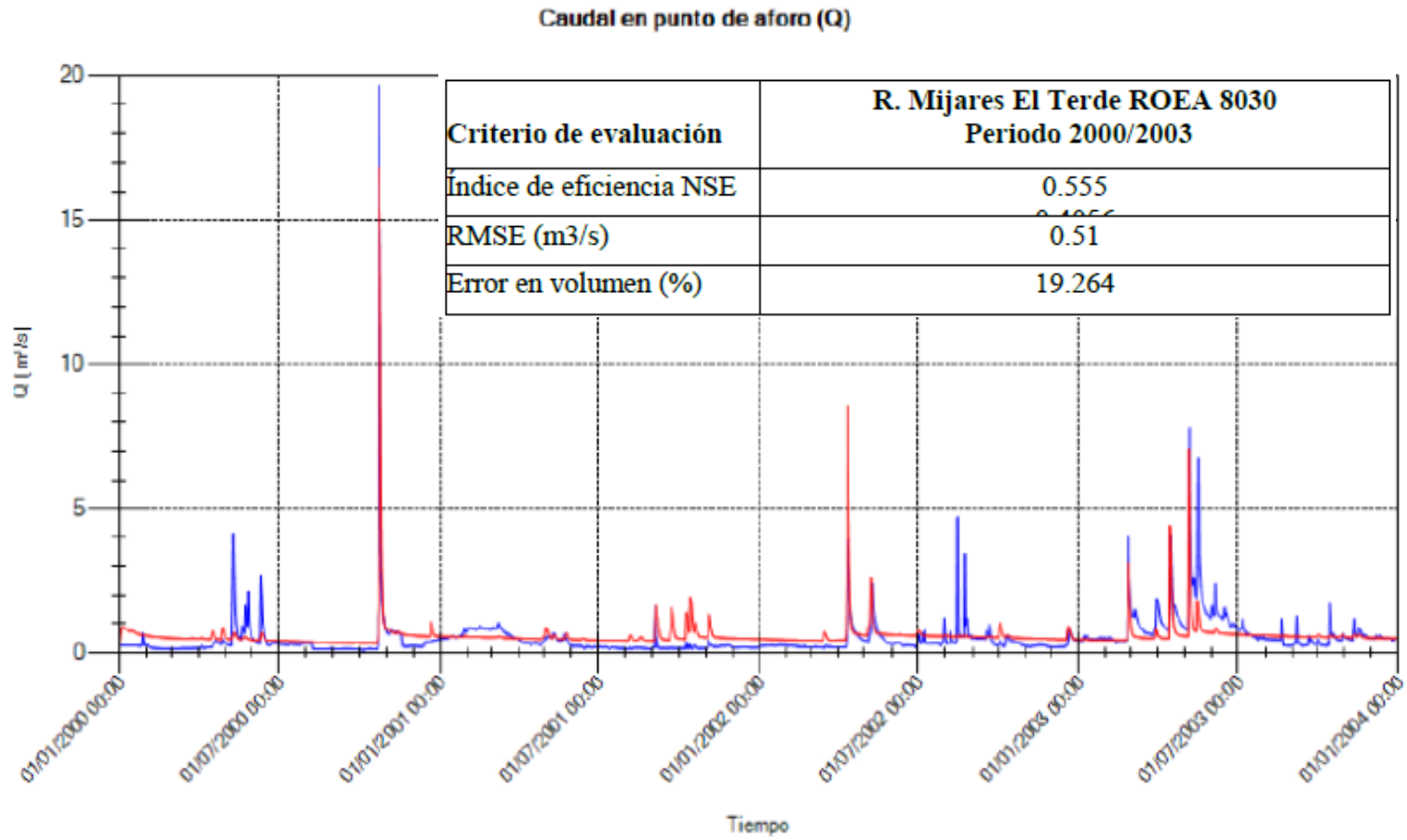
- **Escala espacial:** celdas 100x100m
- **Escala temporal:** simulación diaria
- **Periodos:**       **calibración 2000-2003 (4 años):**  
                          **validación temporal 1991-2008 (17 años).**
- **Fuentes de datos:**
  - **Datos de aforos:**    **calibración**                    ROEA 8030 ‘El Terde’  
                                  **validación espacial**    ROEA 8134 ‘Entrada Emb. Arenós’
  - **Datos evapotranspiración:** - Hargreaves con Tª Spaino2, corregido con SIAR.
  - **Datos precipitación:**   - **SAIH**
    - Spaino2v2 (malla 0.2x0.2°)
    - Spaino2v4 (malla 0.11x0.11°)
- **Variantes del modelo TETIS a evaluar:**
  - **Sin Karst**
  - **Con Karst**

# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## SIN Karst

### Modelo info. estándar (SAIH).

- Calibración 2000-2003 en aforo 'El Terde' ROEA 8030.

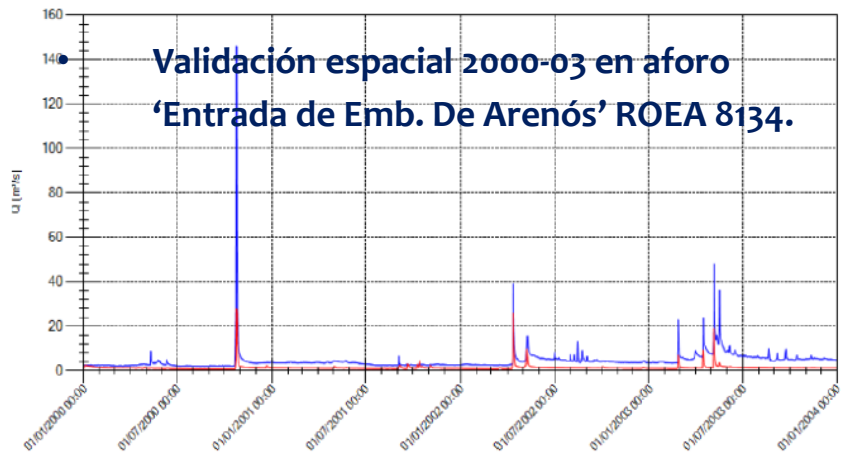


# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## SIN Karst

### Modelo info. estándar (SAIH).

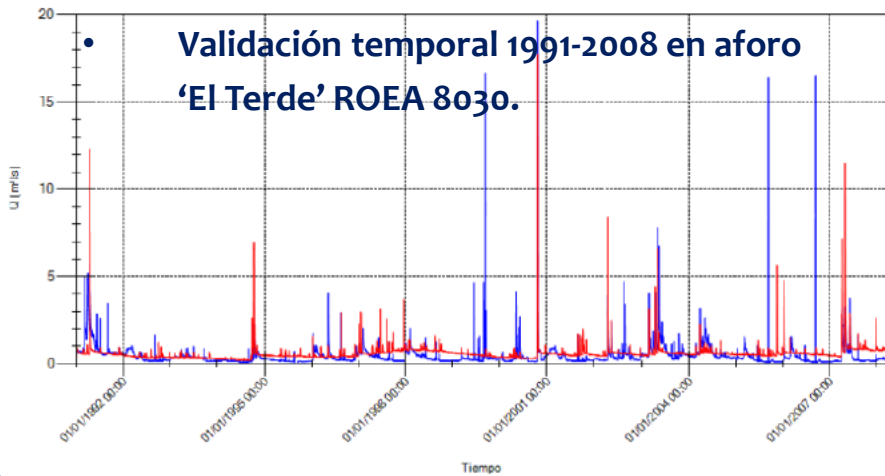
Caudal en punto de aforo (Q)



Validación espacial 2000-03 en aforo  
‘Entrada de Emb. De Arenós’ ROEA 8134.

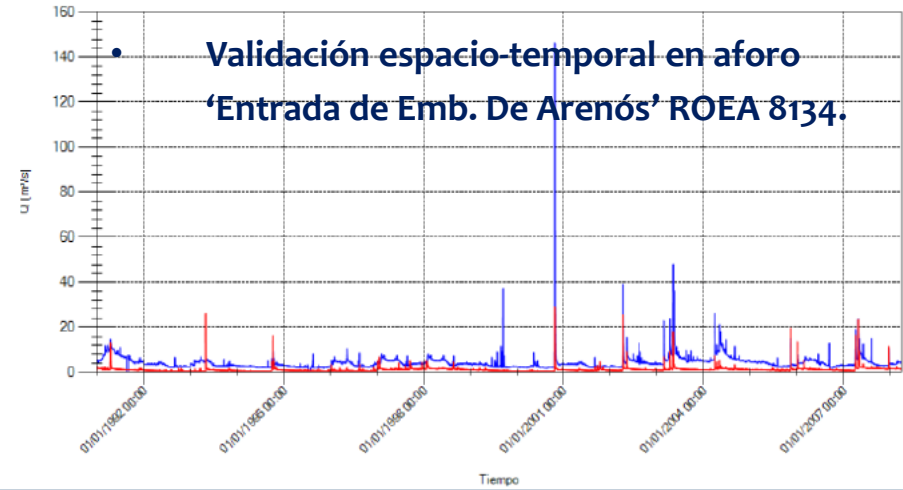
Criterio de evaluación	R. Mijares Entrada de Arenós ROEA 8134 Periodo 2000/2003
Índice de eficiencia NSE	0.013
RMSE (m3/s)	4.968
Error en volumen (%)	-69.034
Criterio de evaluación	Aforo El Terde ROEA 8030 Periodo de validación 1991/2008
Índice de eficiencia NSE	0.0474
RMSE (m3/s)	0.635
Error en volumen (%)	32.272
Criterio de evaluación	Aforo Entrada Emb. de Arenós ROEA 8134 Periodo de validación 1991/2008
Índice de eficiencia NSE	-0.6437
RMSE (m3/s)	3.901
Error en volumen (%)	-70.22

Caudal en punto de aforo (Q)



Validación temporal 1991-2008 en aforo  
‘El Terde’ ROEA 8030.

Caudal en punto de aforo (Q)



Validación espacio-temporal en aforo  
‘Entrada de Emb. De Arenós’ ROEA 8134.

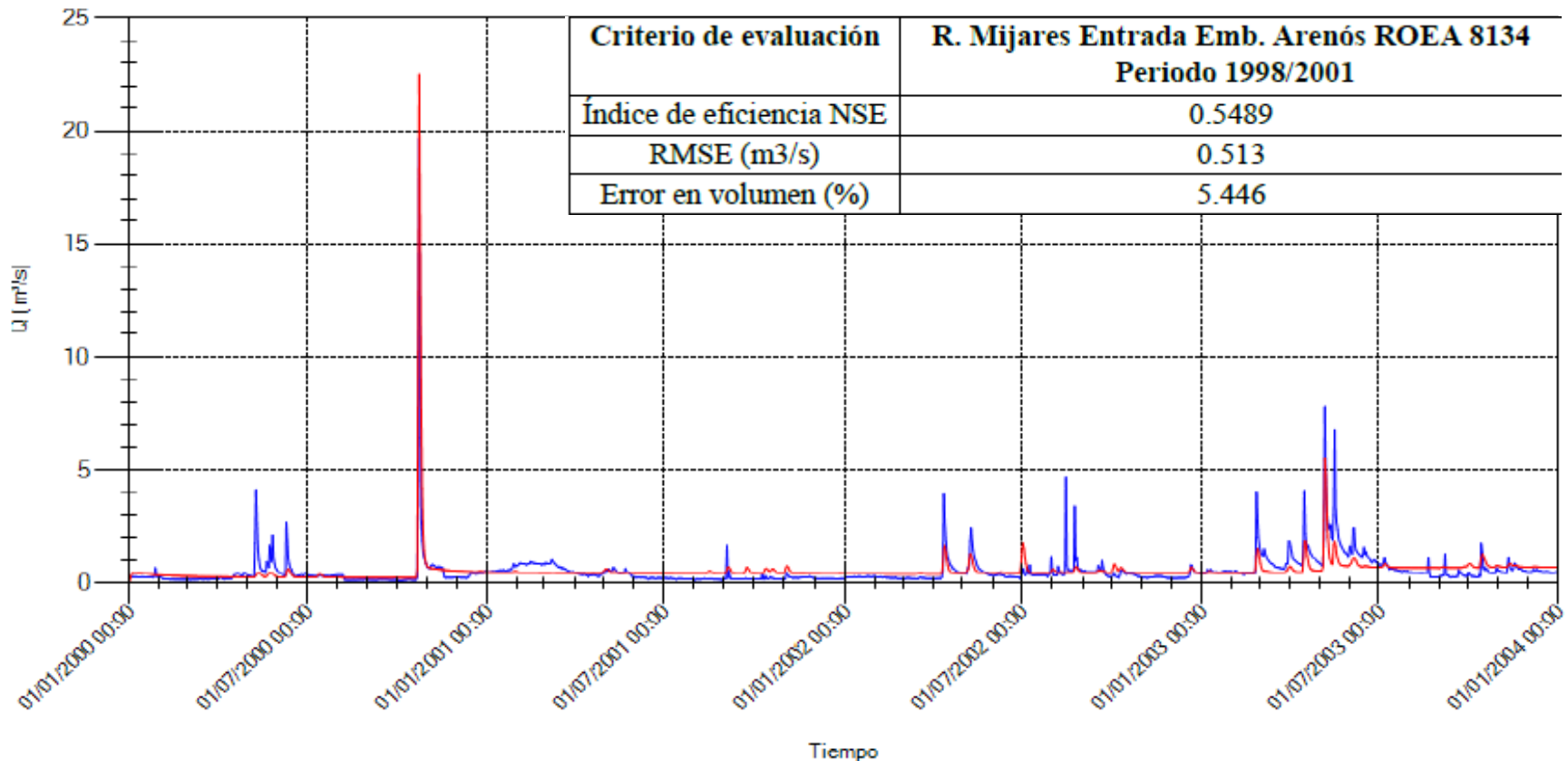
# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## SIN Karst

### Modelo info interpolada (Spain-v2)

- Calibración 2000-2003 en aforo 'El Terde' ROEA 8030.

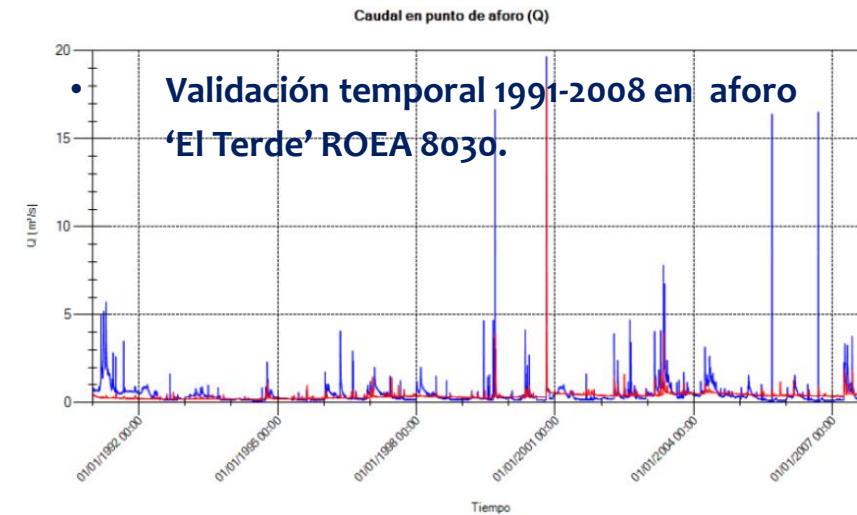
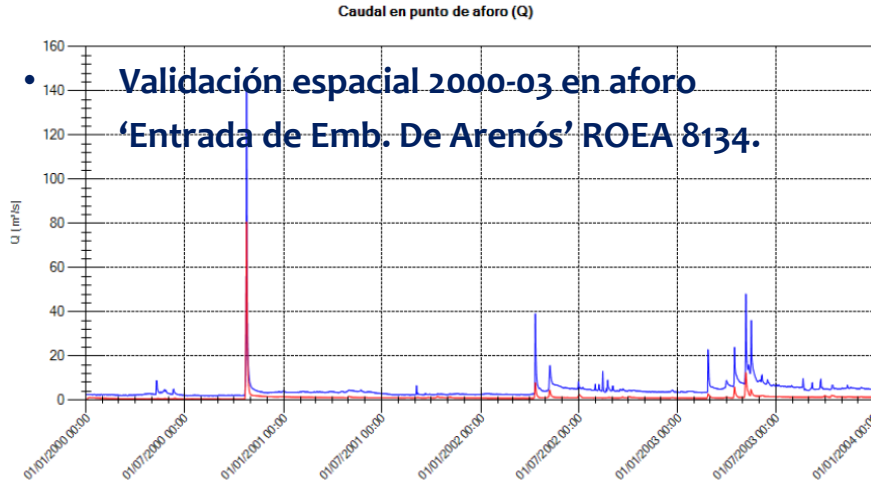
Caudal en punto de aforo (Q)



# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## SIN Karst

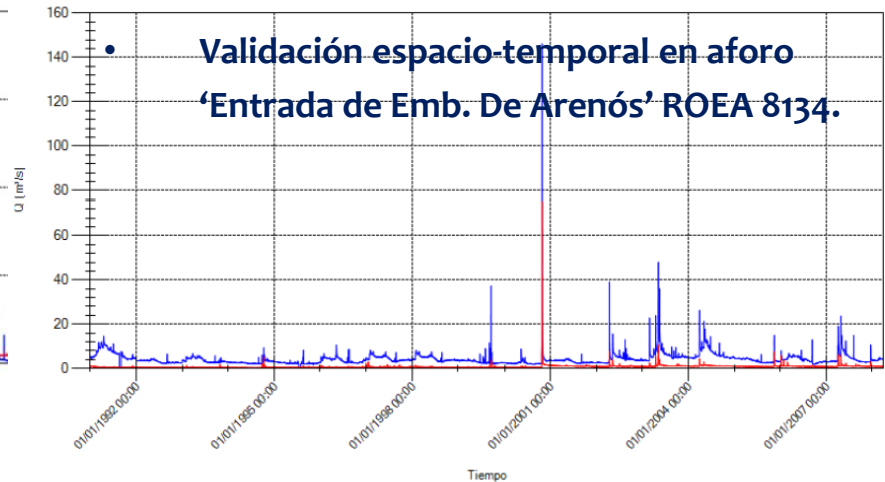
### Modelo info interpolada (Spain-v2)



Criterios de evaluación	Aforo Entrada Emb. De Arenós ROEA 8134
Modelo b/ Spain02v2	Periodo de validación 2000/2003
Índice de eficiencia NSE	0.278
RMSE (m3/s)	4.248
Error en volumen (%)	-69.4043

Criterios de evaluación	Aforo Entrada El Terde ROEA 8030
Modelo b/ Spain02v2	Periodo de validación 1991/2008
Índice de eficiencia NSE	0.237
RMSE (m3/s)	0.569
Error en volumen (%)	0.569

Criterios de evaluación	Aforo Entrada de Arenós ROEA 8134
Modelo b/ Spain02v2	Periodo de validación 1991/2008
Índice de eficiencia NSE	-0.795
RMSE (m3/s)	4.076
Error en volumen (%)	-79.411





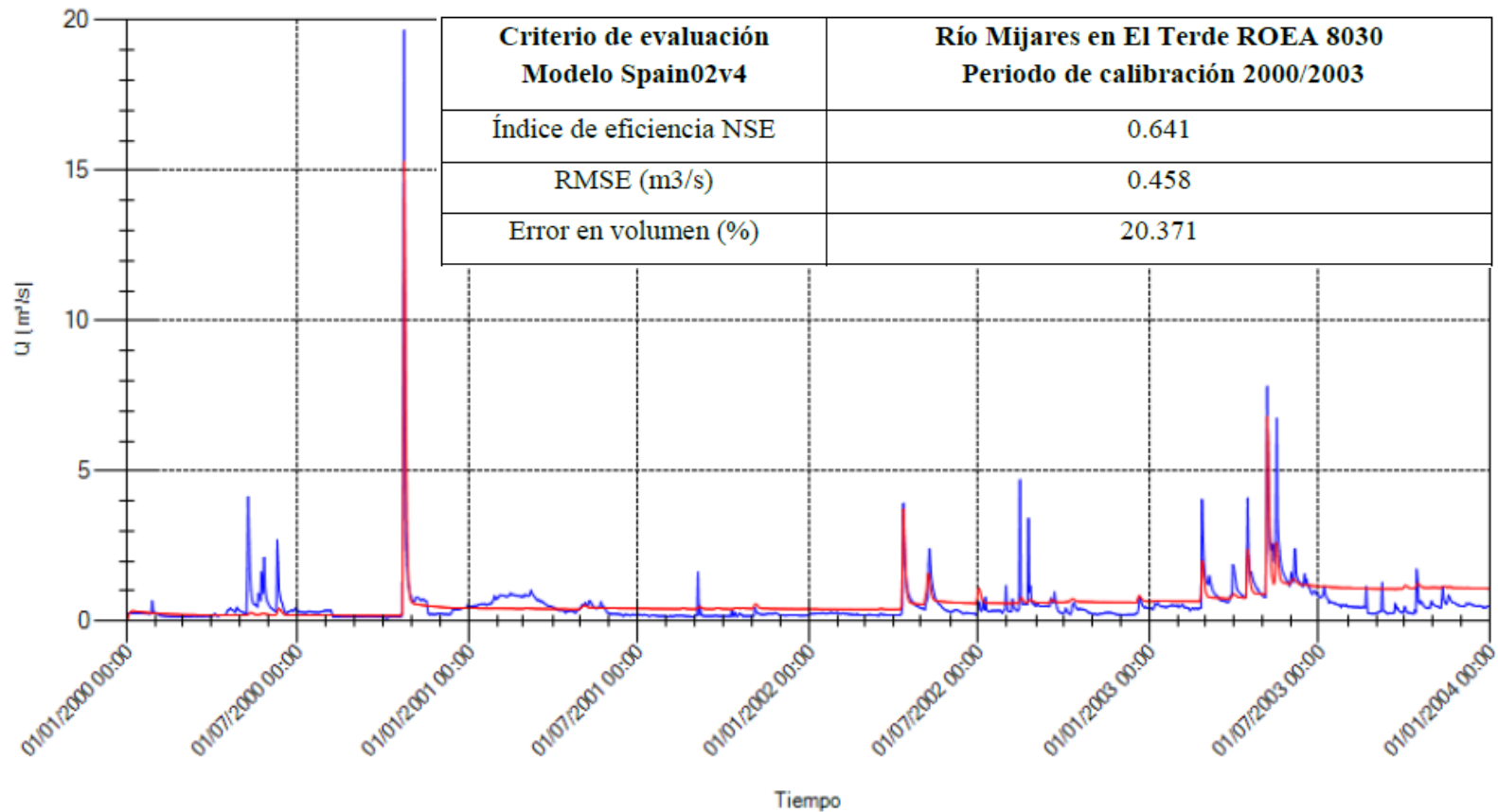
# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## SIN Karst

### Modelo info interpolada (Spain-v4)

- Calibración 2000-2003 en aforo 'El Terde' ROEA 8030.

Caudal en punto de aforo (Q)

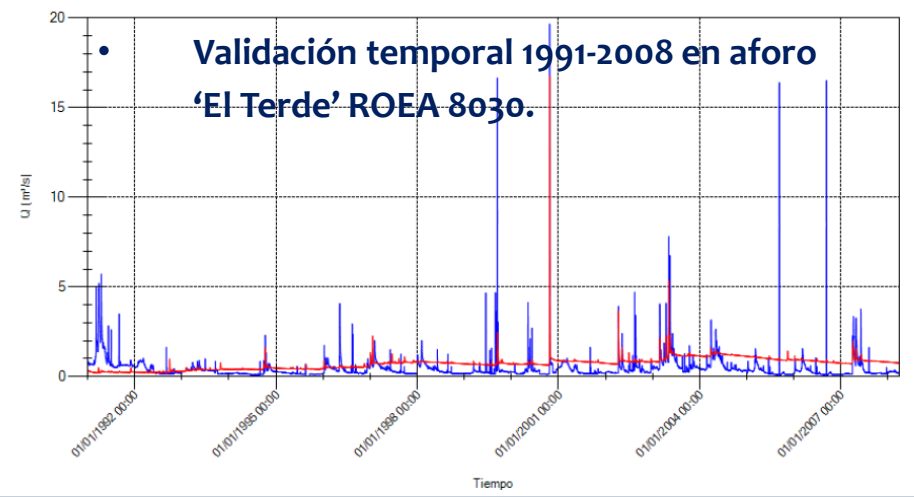
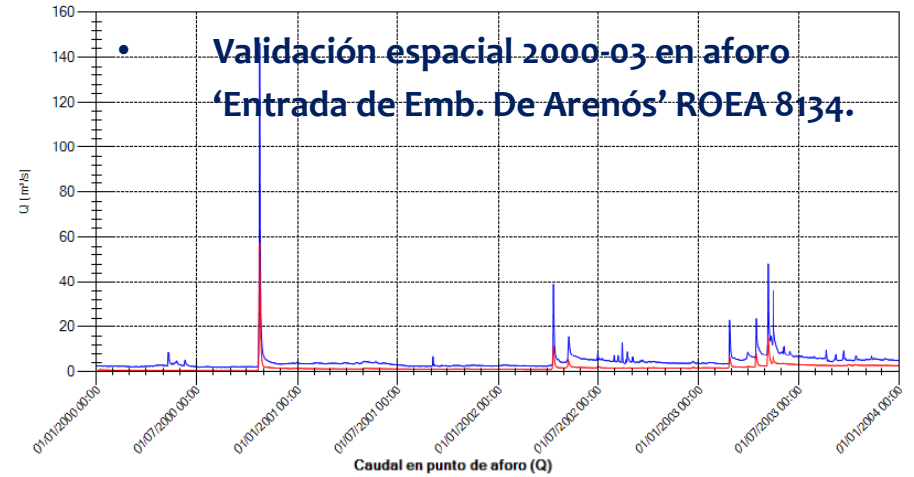


# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## SIN Karst

### Modelo info interpolada (Spain-v4)

Caudal en punto de aforo (Q)

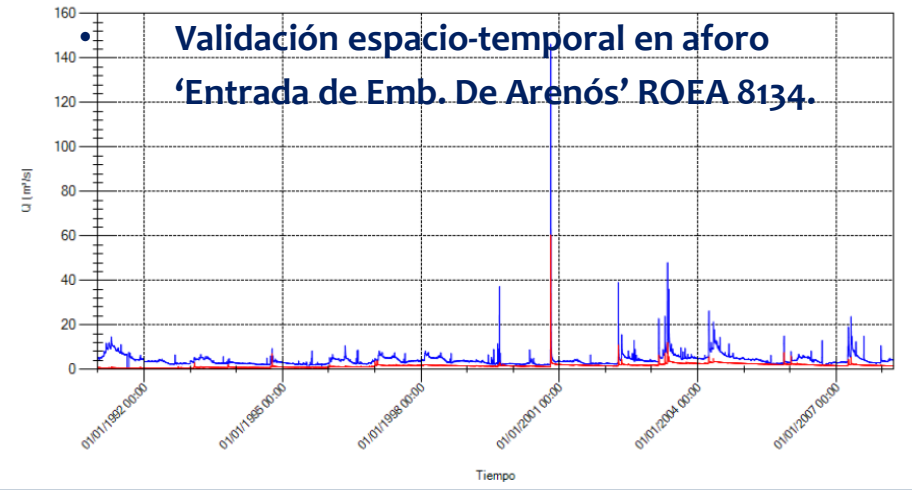


Criterios de evaluación Modelo b/ Spain02v4	Aforo Entrada Emb. de Arenós ROEA 8134 Periodo de validación 2000/2003
Índice de eficiencia NSE	0.324
RMSE (m3/s)	4.11
Error en volumen (%)	-60.956

Criterios de evaluación Modelo b/ Spain02v2	Aforo El Terde ROEA 8030 Periodo de validación 1991/2008
Índice de eficiencia NSE	-0.080
RMSE (m3/s)	0.677
Error en volumen (%)	60.584

Criterios de evaluación Modelo b/ Spain02v4	Aforo Entrada Emb. de Arenós ROEA 8134 Periodo de validación 1991/2008
Índice de eficiencia NSE	-0.285
RMSE (m3/s)	3.449
Error en volumen (%)	-60.03

Caudal en punto de aforo (Q)



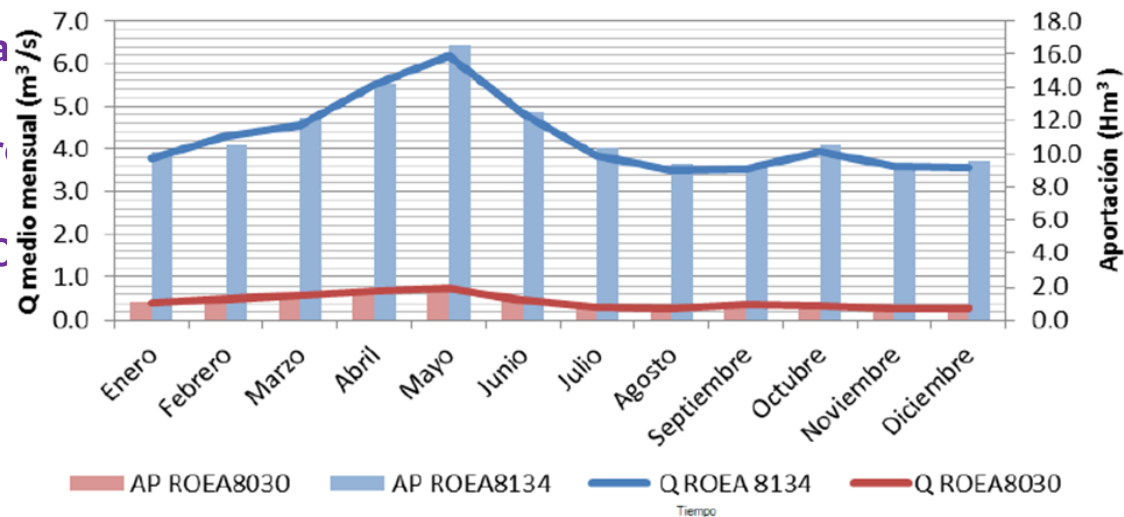
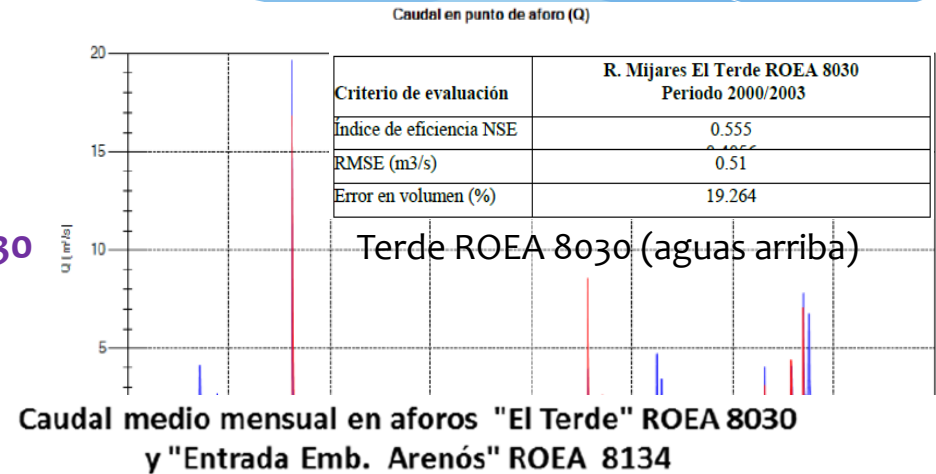
# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## SIN Karst

### Aptitud del modelo

#### Análisis de resultados :

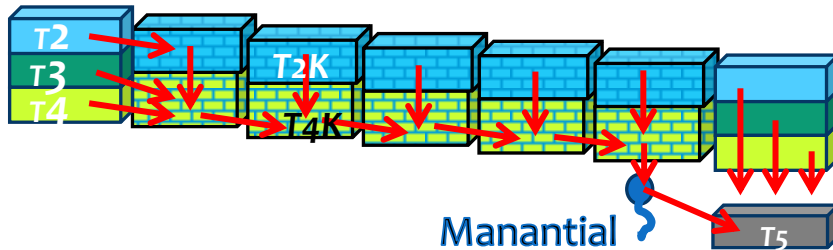
- Aportaciones entre el Terde ROEA8030 y Entrada de Arenós ROEA 8134, aportación (x10) frente a superficie sólo (x2).
- Dificultad de alcanzar resultados de simulación aceptables simultáneamente en los aforos Terde ROEA 8030 y Entrada Emb. de Arenós RC



# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## CON Karst

TETIS en configuración de Karst presenta cambios estructurales en tanques y distribución de flujos:



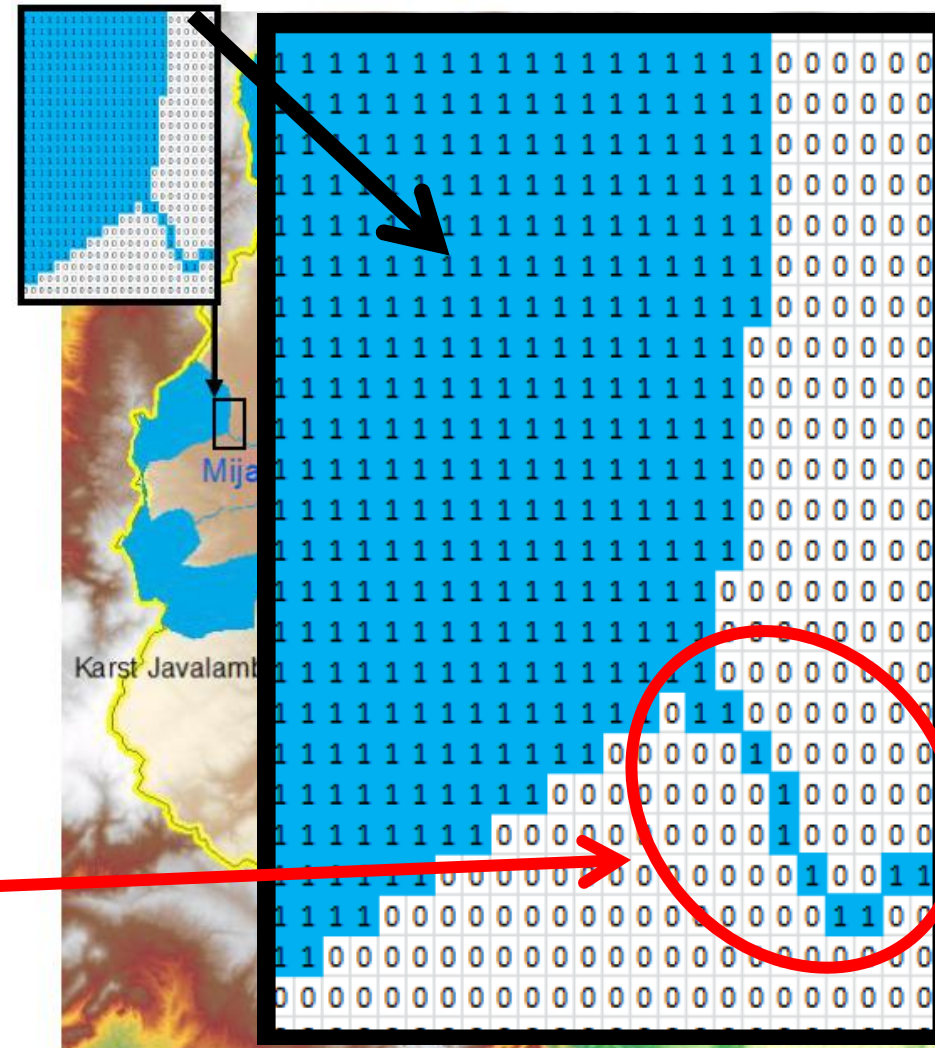
Mapa de área del Karst  
(zona de recarga)

+

Localización de los manantiales  
(fuera del Karst, y no en el límite)

+

Canales flujo preferente  
(ficticios, para unir área karst con manantiales, siguen topografía/MLA)



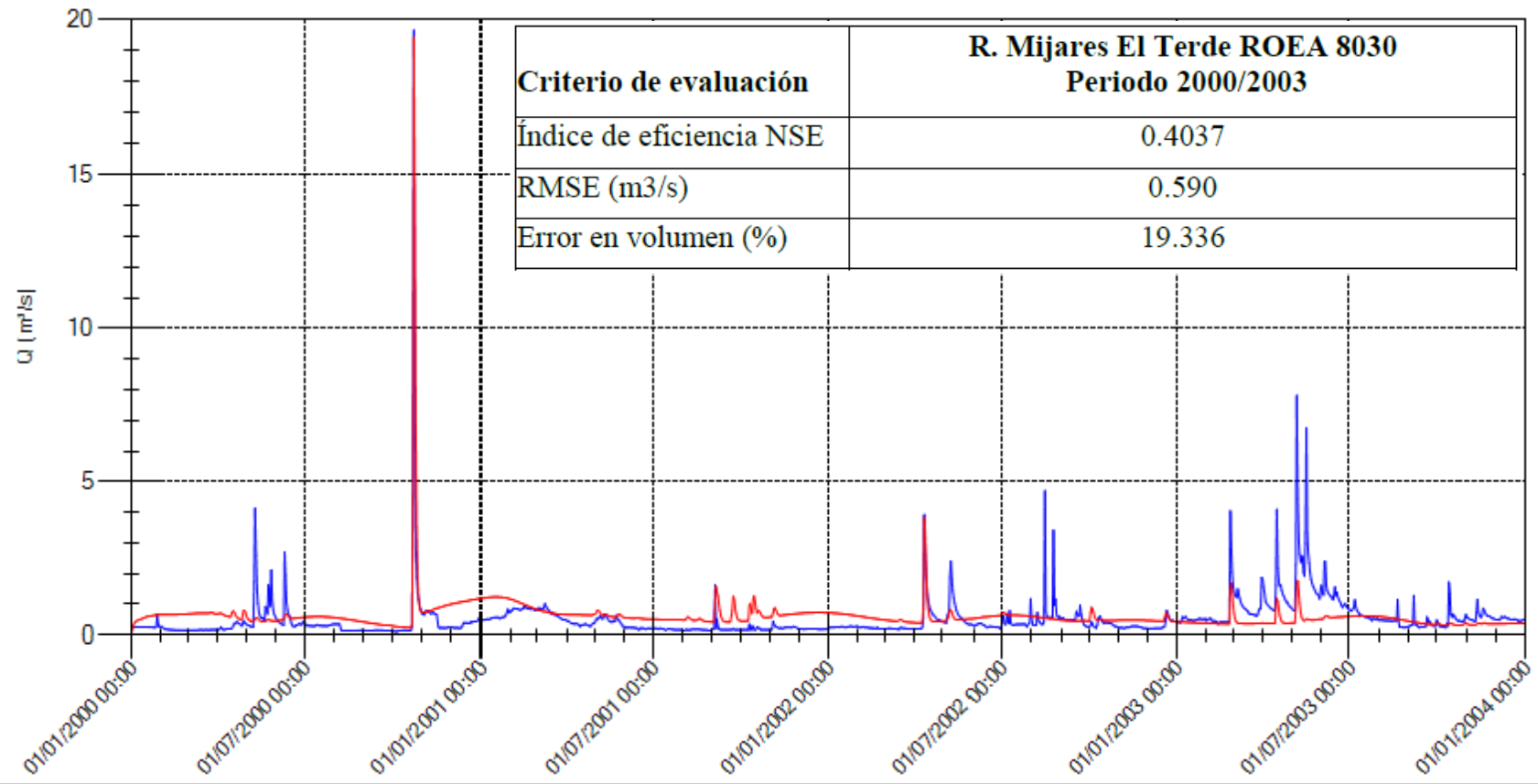
# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## CON Karst

### Modelo info estándar (SAIH)

- Calibración 2000-2003 en aforo 'El Terde' ROEA 8030.

Caudal en punto de aforo (Q)

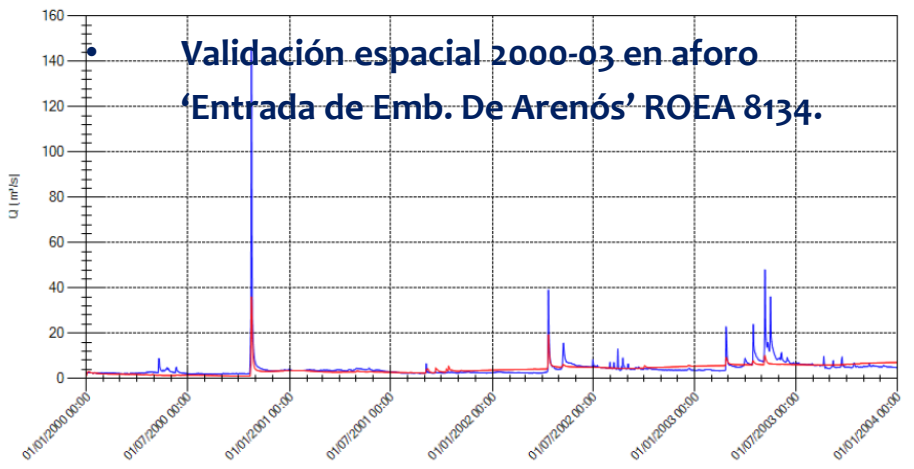


# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## CON Karst

### Modelo info estándar (SAIH)

Caudal en punto de aforo (Q)

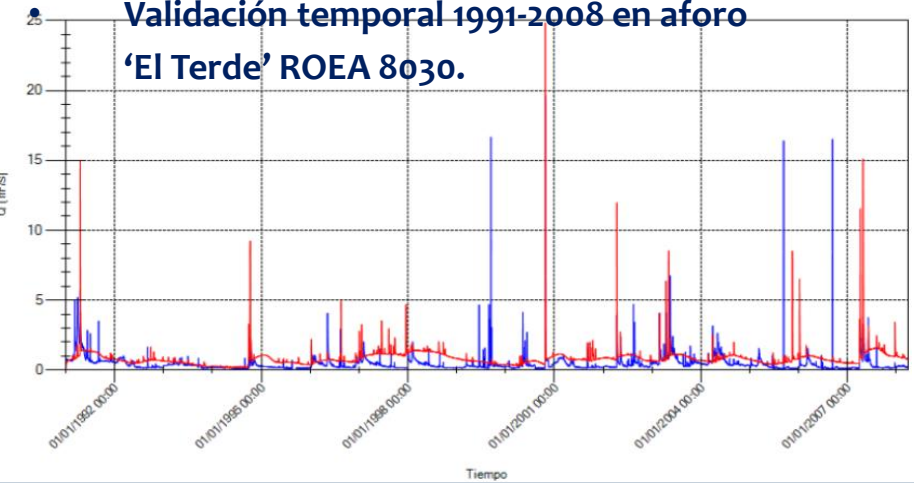


Criterio de evaluación	R. Mijares Entrada de Arenós ROEA 8134 Periodo 2000/2003
Índice de eficiencia NSE	0.437
RMSE (m3/s)	3.752
Error en volumen (%)	-7.701

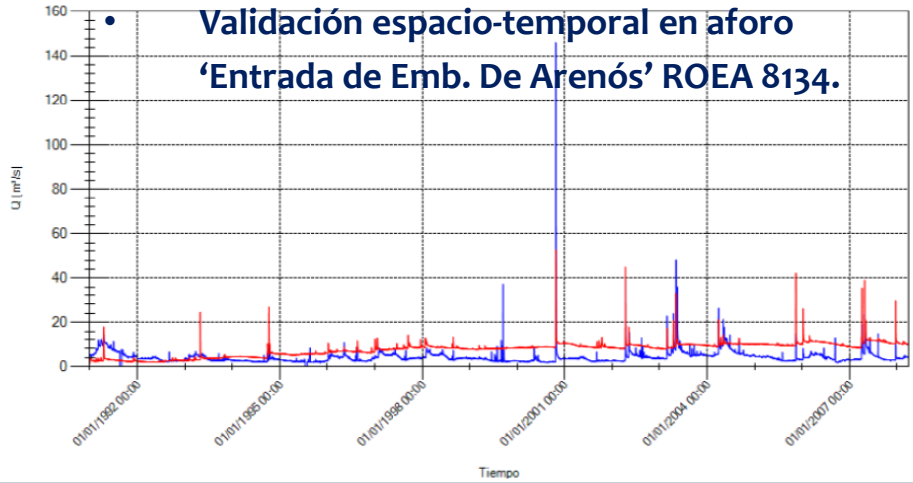
Criterio de evaluación	Aforo El Terde ROEA 8030 Periodo de validación 1991/2008
Índice de eficiencia NSE	-0.6928
RMSE (m3/s)	0.847
Error en volumen (%)	90.7641

Criterio de evaluación	Aforo Entrada Emb. de Arenós ROEA 8134 Periodo de validación 1991/2008
Índice de eficiencia NSE	-1.5889
RMSE (m3/s)	4.896
Error en volumen (%)	81.306

Caudal en punto de aforo (Q)



Caudal en punto de aforo (Q)



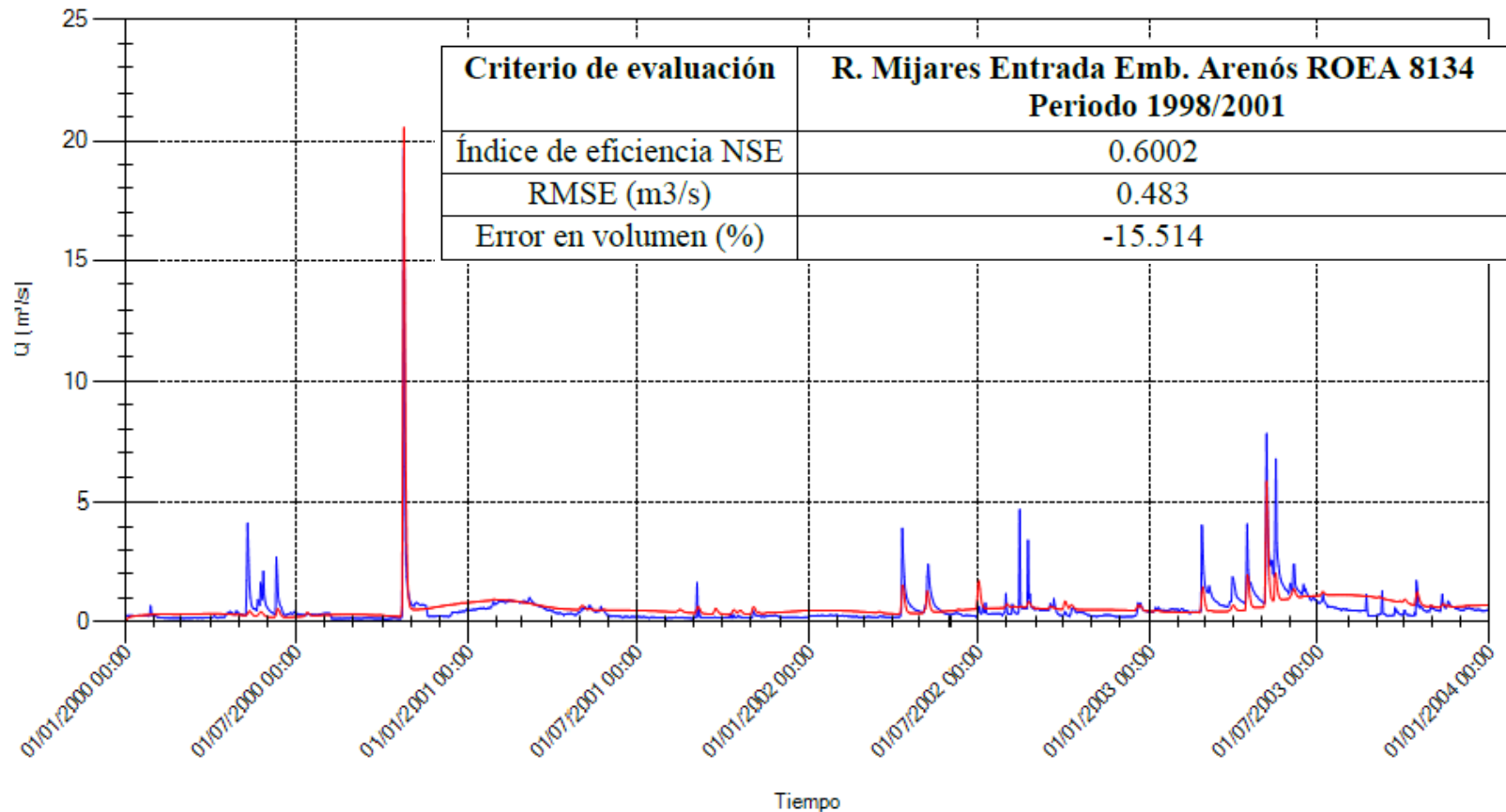
# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## CON Karst

### Modelo info interpolada (Spain-v2)

- Calibración 2000-2003 en aforo 'El Terde' ROEA 8030.

Caudal en punto de aforo (Q)



# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

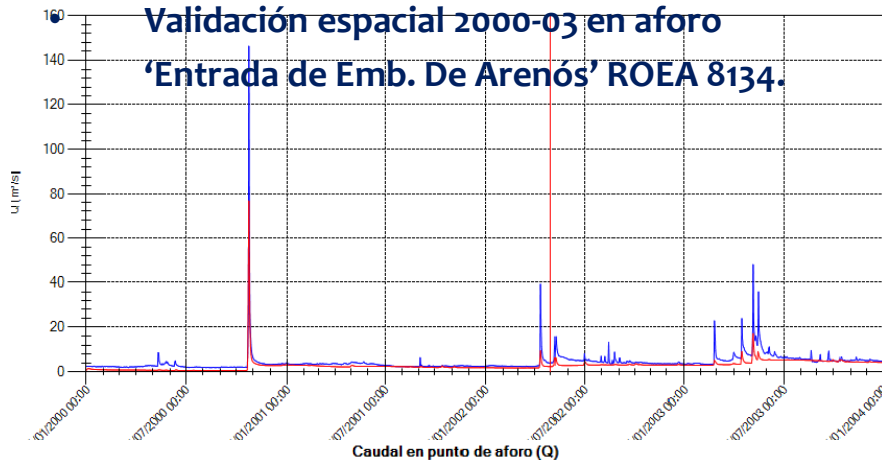
## CON Karst

### Modelo info interpolada (Spain-v2)

Caudal en punto de aforo (Q)

Validación espacial 2000-03 en aforo

‘Entrada de Emb. De Arenós’ ROEA 8134.



Caudal en punto de aforo (Q)

Criterios de evaluación Modelo b/ Spain02v2	Aforo Entrada Emb. De Arenós ROEA 8134 Periodo de validación 2000/2003
Índice de eficiencia NSE	0.6139
RMSE (m3/s)	3.107
Error en volumen (%)	-33.173

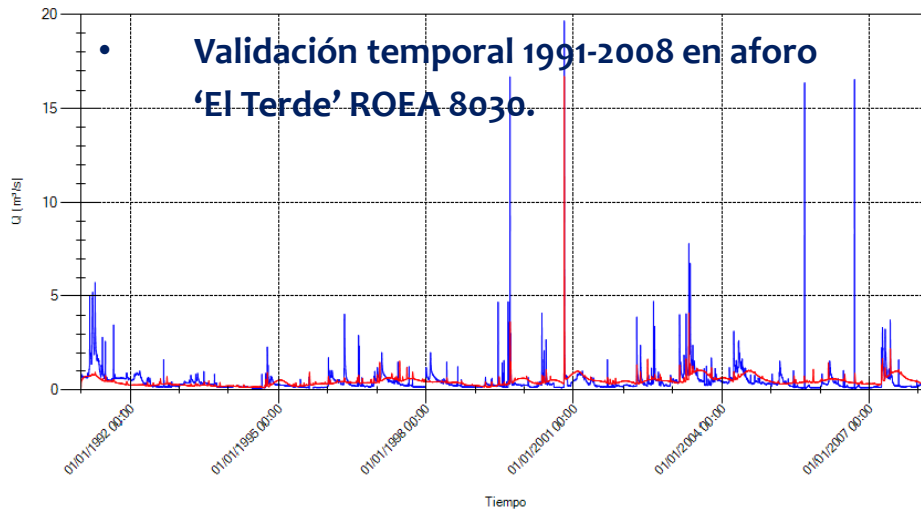
Criterios de evaluación Modelo b/ Spain02v2	Aforo Entrada El Terde ROEA 8030 Periodo de validación 1991/2008
Índice de eficiencia NSE	0.2841
RMSE (m3/s)	0.551
Error en volumen (%)	6.855

Criterios de evaluación Modelo b/ Spain02v2	Aforo Entrada de Arenós ROEA 8134 Periodo de validación 1991/2008
Índice de eficiencia NSE	0.280
RMSE (m3/s)	2.581
Error en volumen (%)	--23.396

Caudal en punto de aforo (Q)

Validación temporal 1991-2008 en aforo

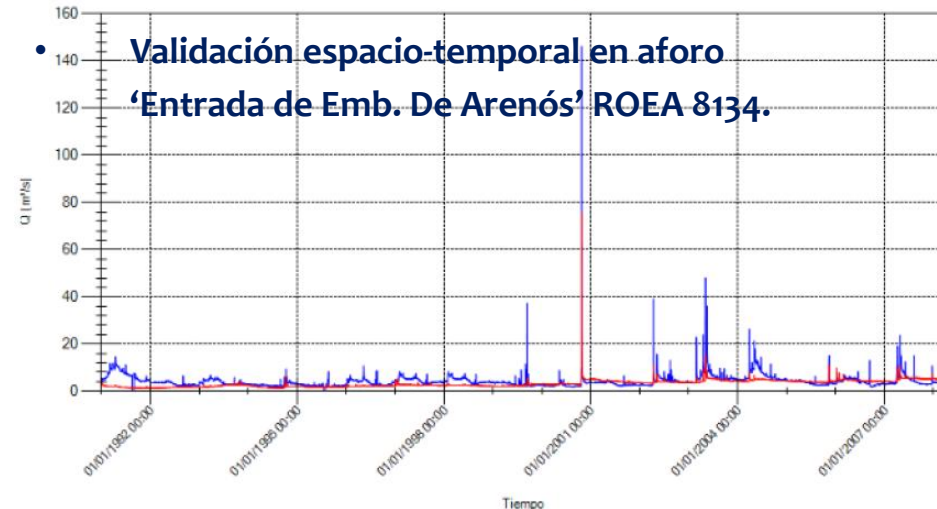
‘El Terde’ ROEA 8030.



Tiempo

Validación espacio-temporal en aforo

‘Entrada de Emb. De Arenós’ ROEA 8134.



Tiempo



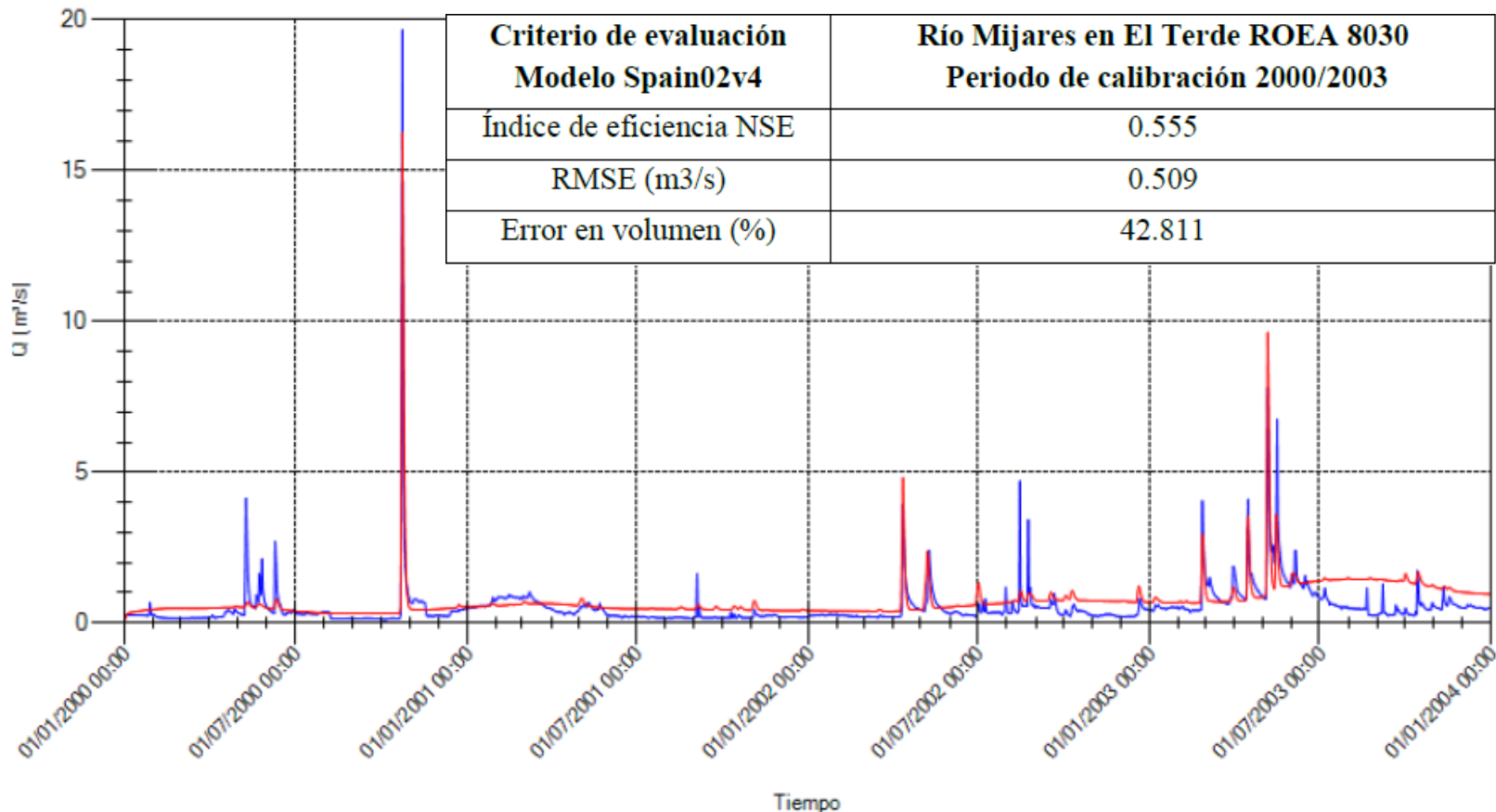
# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## CON Karst

### Modelo info interpolada (Spainv4).

- Calibración 2000-2003 en aforo 'El Terde' ROEA 8030.

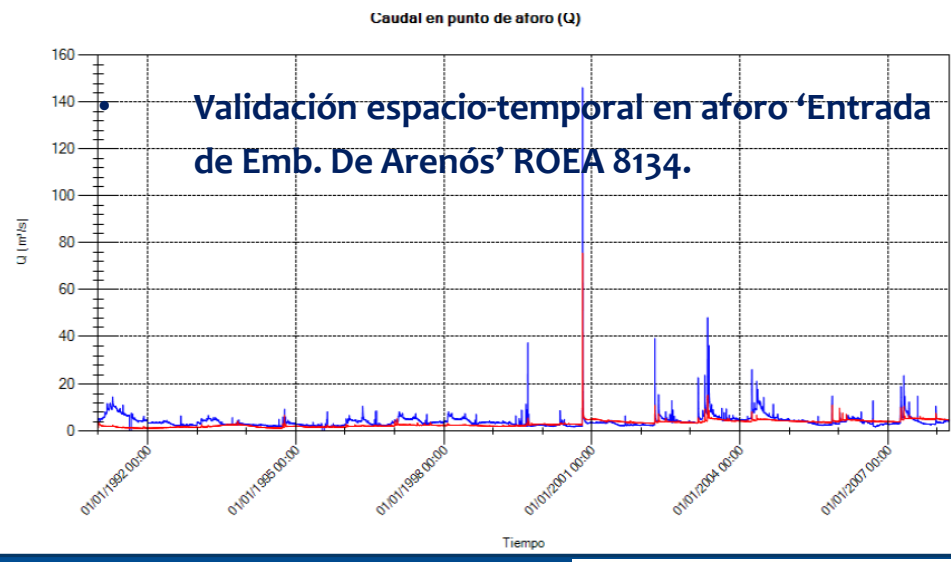
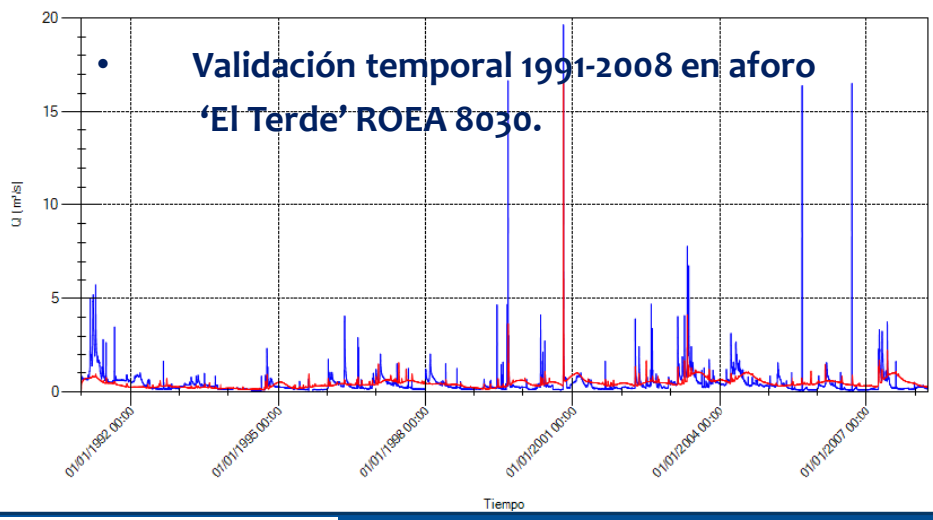
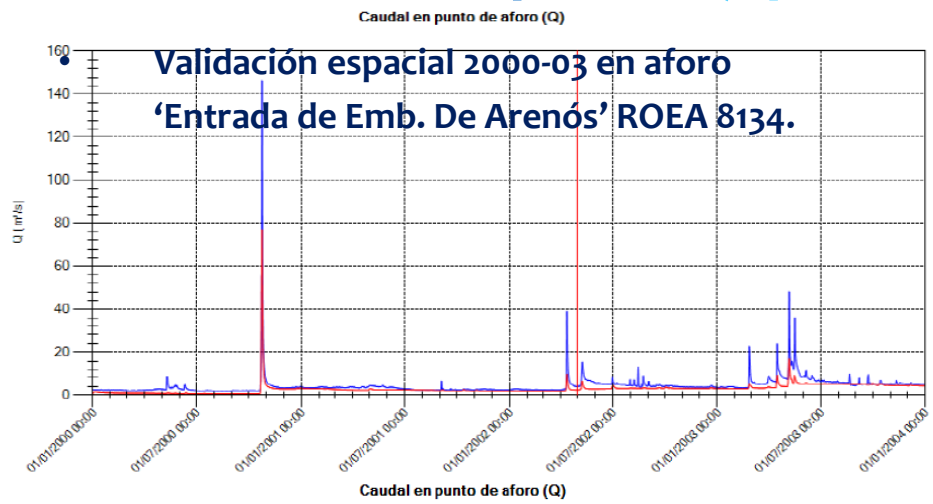
Caudal en punto de aforo (Q)



# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## CON Karst

### Modelo info interpolada (Spainv4).



<b>Criterios de evaluación</b>	<b>Aforo El Terde ROEA 8030</b>
<b>Modelo b/ Spain02v2</b>	<b>Periodo de validación 1991/2008</b>
Índice de eficiencia NSE	0.284
RMSE (m3/s)	0.55
Error en volumen (%)	6.855

<b>Criterios de evaluación</b>	<b>Aforo Entrada Emb. de Arenós ROEA 8134</b>
<b>Modelo b/ Spain02v4</b>	<b>Periodo de validación 1991/2008</b>
Índice de eficiencia NSE	0.2803
RMSE (m3/s)	2.581
Error en volumen (%)	-23.396

<b>Criterios de evaluación</b>	<b>Aforo El Terde ROEA 8030</b>
<b>Modelo b/ Spain02v2</b>	<b>Periodo de validación 1991/2008</b>
Índice de eficiencia NSE	0.284
RMSE (m3/s)	0.55
Error en volumen (%)	6.855

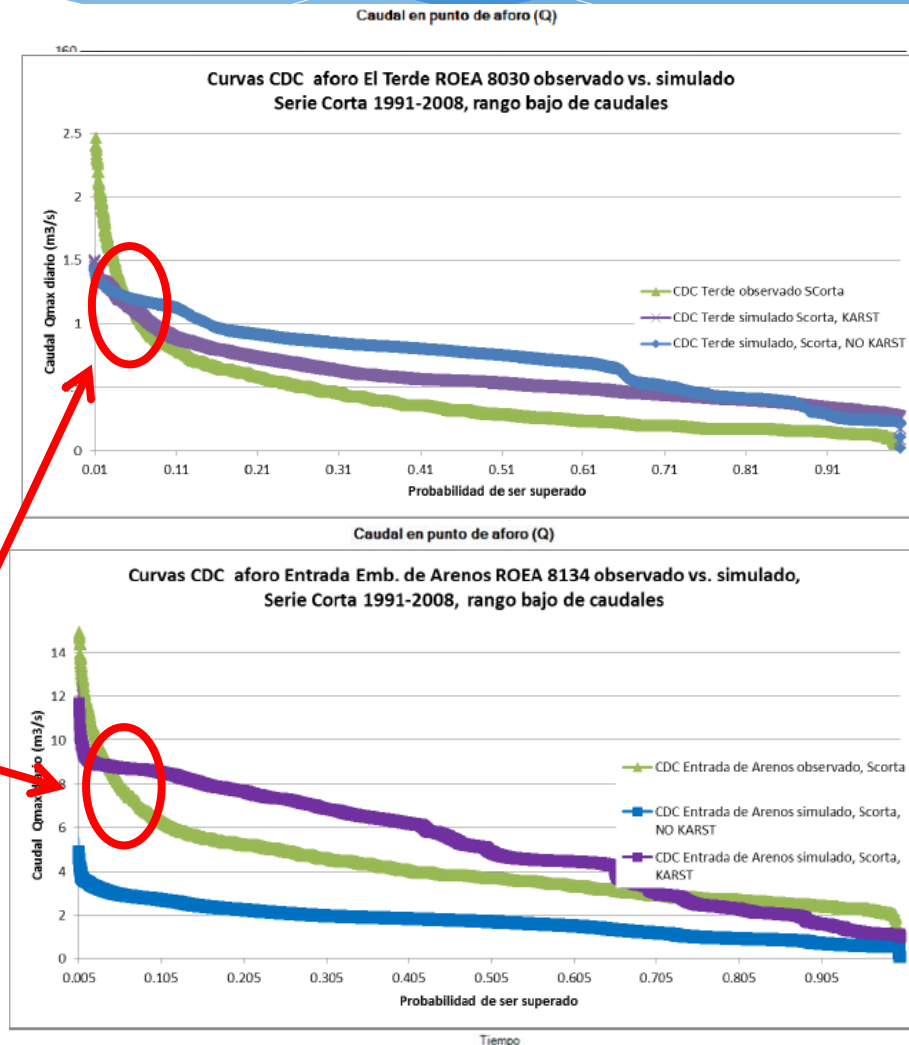
# VI – CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

## CON Karst

### Aptitud del modelo

#### Análisis de resultados :

- Mejora la simulación de ambos aforos: simultáneamente: reduce sobreestimación de  $Q$  en Terde (aguas arriba descarga Karst) y no infravalora  $Q$  en Entrada de Arenós (aguas abajo descarga Karst)
- Inconveniente en la calibración: tendencia a mejor ajuste sobre  $Q$  medio de aportaciones subterráneas del Karst, lo que sesga la simulación, peor representación de los rangos de  $Q$  altos (crecidas) o bajos (RRHH).



## Aptitud de los datos

### Datos hidrológicos (aforos) :

**Discontinuidad de los registros SAIH** frente a los ROEA, especialmente en el uso de datos de 1ª década SAIH, **sugiere toma de medidas en la mejora de la validación de datos SAIH, y reinicio de registro foronómico en afluentes importantes: p.ej. Río Albentosa**

### Datos meteorológicos (SAIH):

**Baja densidad aún en el registro pluviométrico del SAIH**, especialmente en regiones montañosas propensas a fenómenos localizados (muy relevante en la generación de crecidas), y falta de integración con datos AEMET, SIA. **Falta de registro dedicado de evapotranspiración**, output predominante en cuencas áridas muy forestadas, que produce gran incertidumbre en la estimación mediante uso de fórmulas Penman-Monteith/Hargreaves. **Es necesario integrar todos los sistemas de observación hidrometeorológica.**

## Aptitud de los datos

### Datos meteorológicos interpolados (Spain02):

**Mejoran los resultados de los modelos alimentados por datos observados, permite su uso como soporte o sustitución de los anteriores en cuencas con pocos registros meteorológicos especialmente en regiones montañosas propensas a fenómenos localizados (muy relevante en la generación de crecidas).**

**Las versiones elaboradas mediante procedimientos avanzados de interpolación (geoestadística) que tienen en cuenta otras características físicas y climáticas del territorio (p.ej. Kriging), tienen la mejor capacidad para modelización de cuencas poco registradas, y son fáciles de procesar/integrar, pero es necesario dar continuidad a los proyectos de obtención de datos interpolados, por su utilidad para la modelización hidrológica distribuida.**

## Aptitud del modelo

**El módulo de Karst de TETIS mejora la simulación hidrológica en cuencas con presencia de fenómenos kársticos:**

al conseguir emular la captación en cabecera por el macizo kárstico y la derivación de esas aportaciones hasta los manantiales identificados, **porque permite la calibración del modelo a la singularidad de baja escurrentía aguas arriba de los manantiales y repentina fuerte aportación tras ellos.**

El módulo Karst de TETIS hasta ahora sólo admite la definición de manantiales en los límites del Karst:

**Se hace necesario permitir la localización de manantiales fuera de la región de captación del Karst,** para poder emular comportamientos kársticos complejos como en el caso del alto Mijares, donde los manantiales se localizan en el afloramiento lejano de los materiales del acuífero kárstico.

## Aptitud del modelo

**En los casos con manantiales alejados, es necesario definir caminos preferenciales para dirigir el flujo desde las zonas de captación hasta los manantiales de descarga.** Como actualmente sólo se modifican las regiones de captación en el módulo Karst, sería necesario permitir la definición de características hidrogeológicas de todas las celdas involucradas en los procesos kársticos (captación, distribución y descarga), que depende de prestar más atención al estudio hidrogeológico y contar con más información de campo de los sistemas kársticos

**Hay que tener en cuenta que en cuencas con gran componente subterráneo los resultados de simulación se ajustan mejor en los caudales de descarga del karst, de manera que favorece la aptitud del modelo para simulación continua en detrimento de la simulación de eventos.**



# GRACIAS POR SU ATENCIÓN

## Agradecimientos:

Al personal del SAIH Júcar (Carmen González) y CHJ (Javier Sebastián, Fernando Solanes) por su accesibilidad en la distribución de los datos hidrometeorológicos.

Al Grupo de Meteorología de la Universidad de Cantabria por las bases de datos interpolados del proyecto Spain02, cuyos valores sustentan gran parte de lo desarrollado en este trabajo, y en particular a Sixto Herrera, por su asistencia en el uso de los mismos.