

# Estudio del comportamiento hidrológico no-lineal de una pequeña cuenca Mediterránea. Aplicación del estudio a la cuenca de Can Vila (Cataluña).

Universidad Politécnica de Valencia.  
Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos

Proyecto Final de Carrera.  
Modalidad tipo II

Autor: Guiomar Ruiz Pérez  
Tutor: Félix Francés García  
Co-Tutora: Chiara Medici



# ÍNDICE

- Introducción
- Área de estudio
- Período de calibración
- Modelos agregados
- Modelos distribuidos
- Comparación de modelos
- Conclusiones

# INTRODUCCIÓN

- Importancia del conocimiento de los procesos hidrológicos

➔ Cuantitativa (crecidas y sequías)

➔ Cualitativa (contaminación)

- Dependencia a las características particulares de cada región

➔ Dificultad para la transferencia de resultados

# INTRODUCCIÓN

- Modelación de los procesos hidrológicos en ámbito climático templado-húmedo.
- Dinámica estacional muy marcada del clima mediterráneo: alternancia de períodos secos y húmedos.



Comportamiento hidrológico complejo y no-lineal. (*Pilgrim et al., 1999*)

- **¿Son fiables los modelos empleados en el ámbito climático templado – húmedo en cuencas de clima mediterráneo?**

# INTRODUCCIÓN

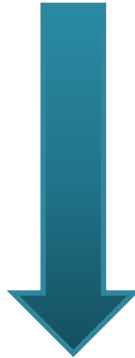
## OBJETIVOS:

- Mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrológico de una pequeña cuenca mediterránea.
- Entender mejor cómo representar la no-linealidad observada en el comportamiento hidrológico de pequeñas cuencas Mediterráneas → Modelos Agregados VS Modelos Distribuidos

# INTRODUCCIÓN

- Procedimiento secuencial:

Complejidad



Modelo agregado LU3

Modelo agregado LU4

Modelo distribuido Tetis\_DHO3

Modelo distribuido Tetis\_DHE3

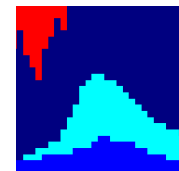
**LU3:**

Conceptual  
Hydrological  
Lumped Model

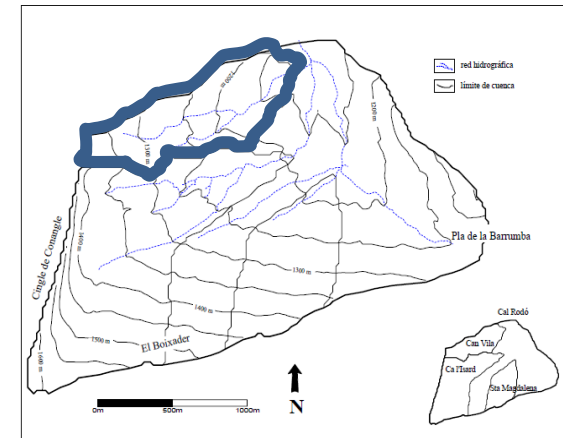
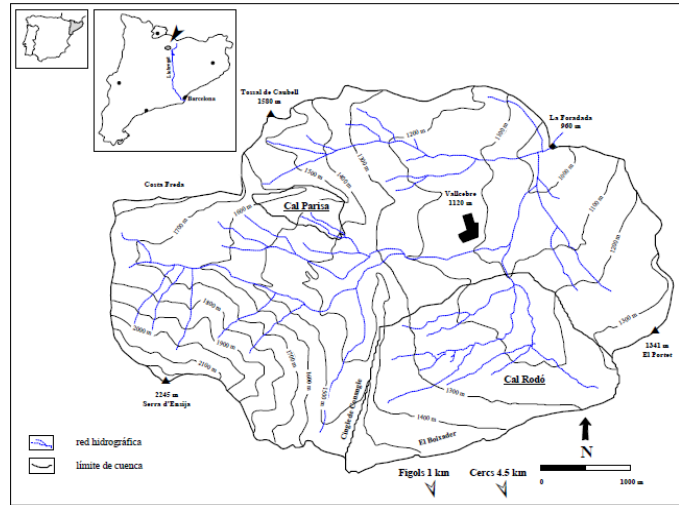
**LU4:**

Conceptual  
Hydrological  
Lumped Model

**TETIS:**



# LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA



# MARCO GEOLÓGICO

Marco geológico del Alto Llobregat:

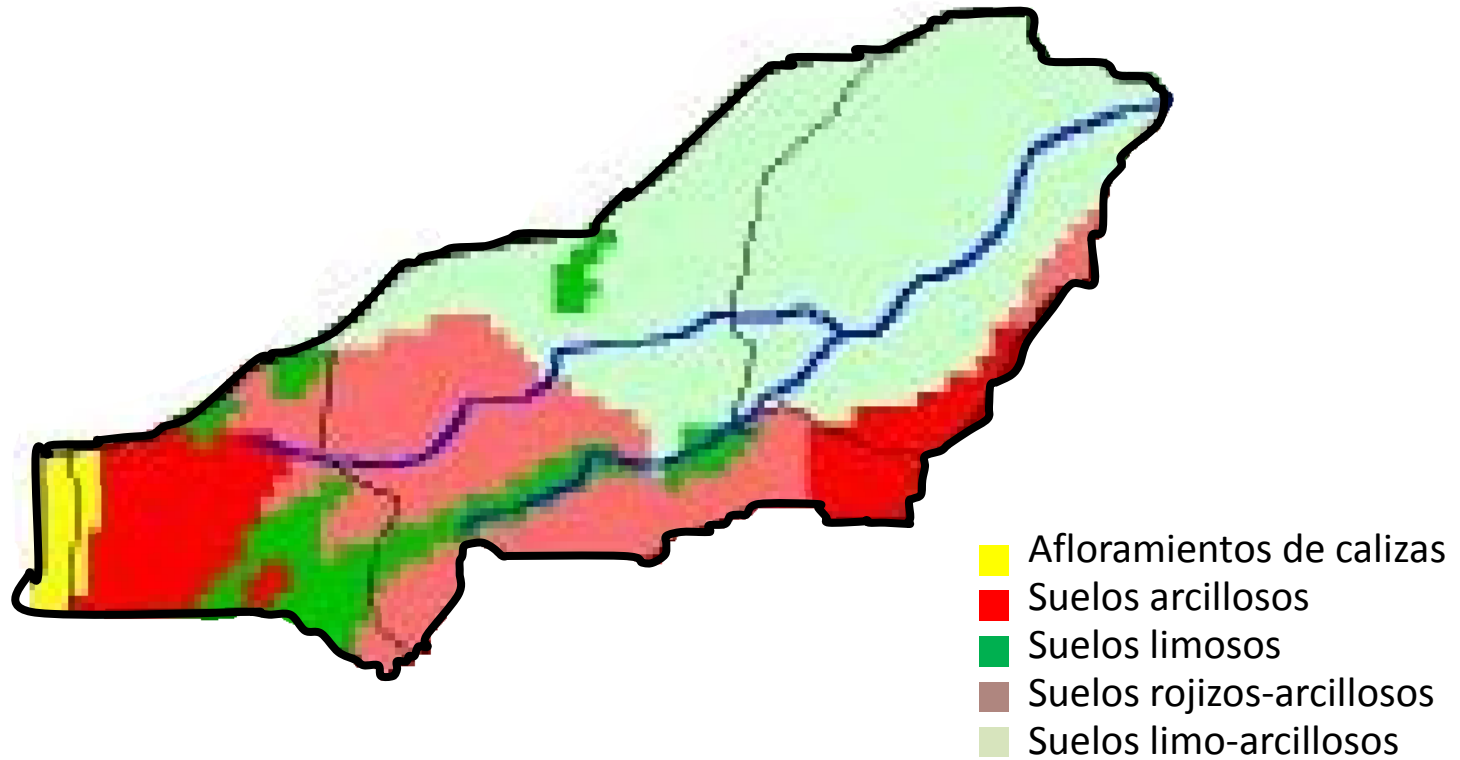
- El zócalo Herciniano.
- La unidad del Cadí.
- El manto del Pedraforca.
- La depresión del Ebro.

Sucesión de capas calizas y margosas

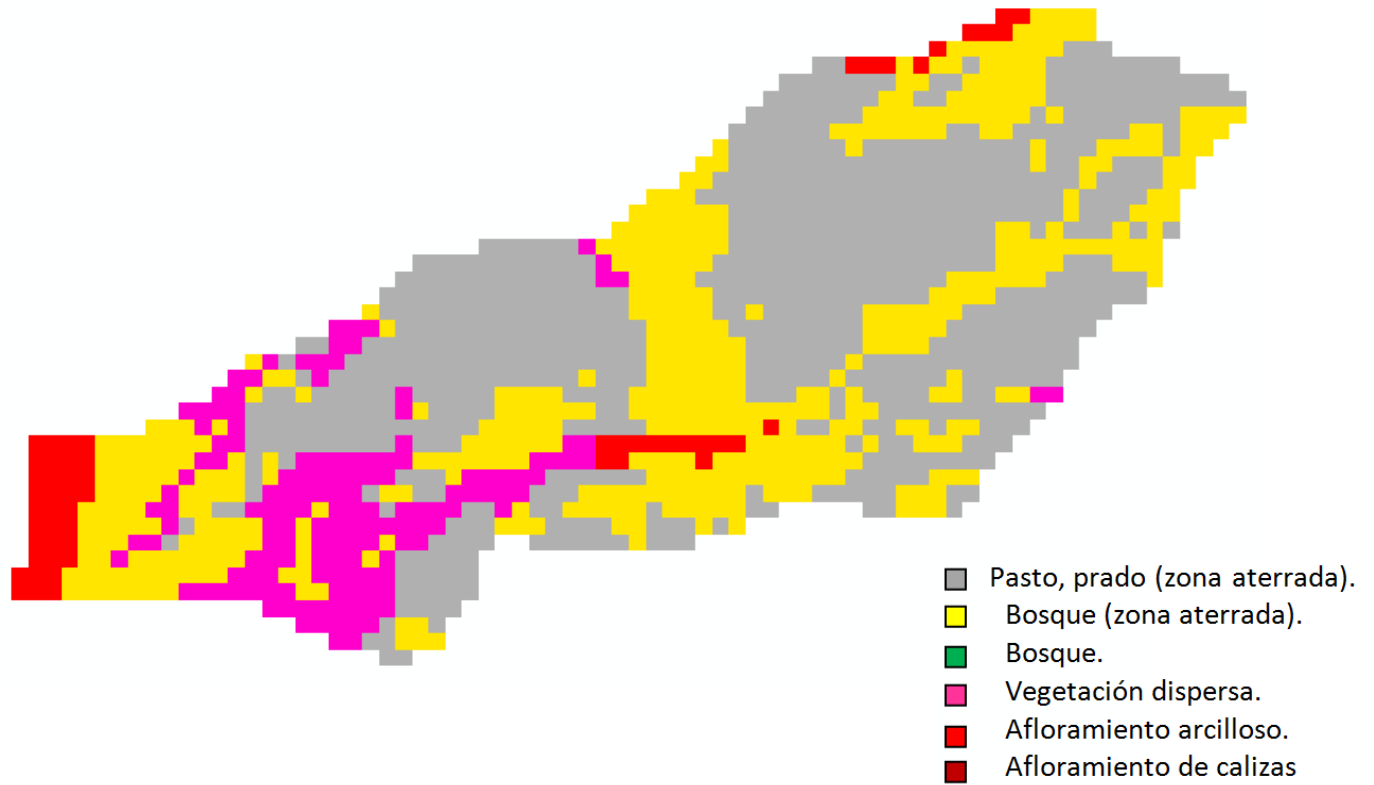




# EDAFOLOGÍA

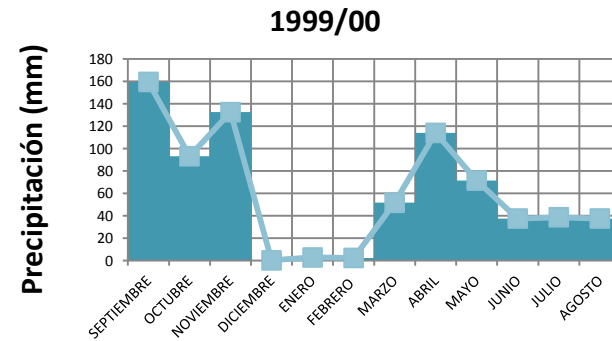
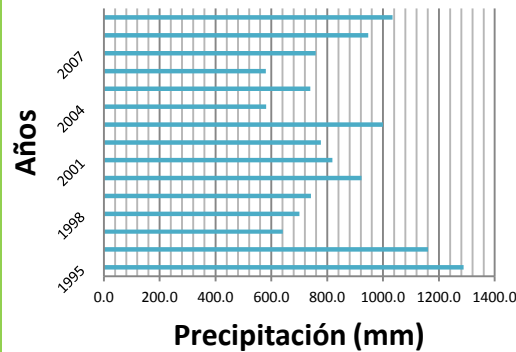


# USOS DEL SUELO



# CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

- Gran variabilidad inter-anual.
- Gran variabilidad intra-anual e incluso mensual
- Alternancia de períodos secos y húmedos



# PERÍODO DE CALIBRACIÓN

- Período 1 (11/05/1995 a 31/08/1999).



Período húmedo



Prec. Máxima Mensual = 325.6 mm



Prec. Media Anual = 871.5 mm

- Período 2 (1/09/2003 a 31/08/2008).



Período seco



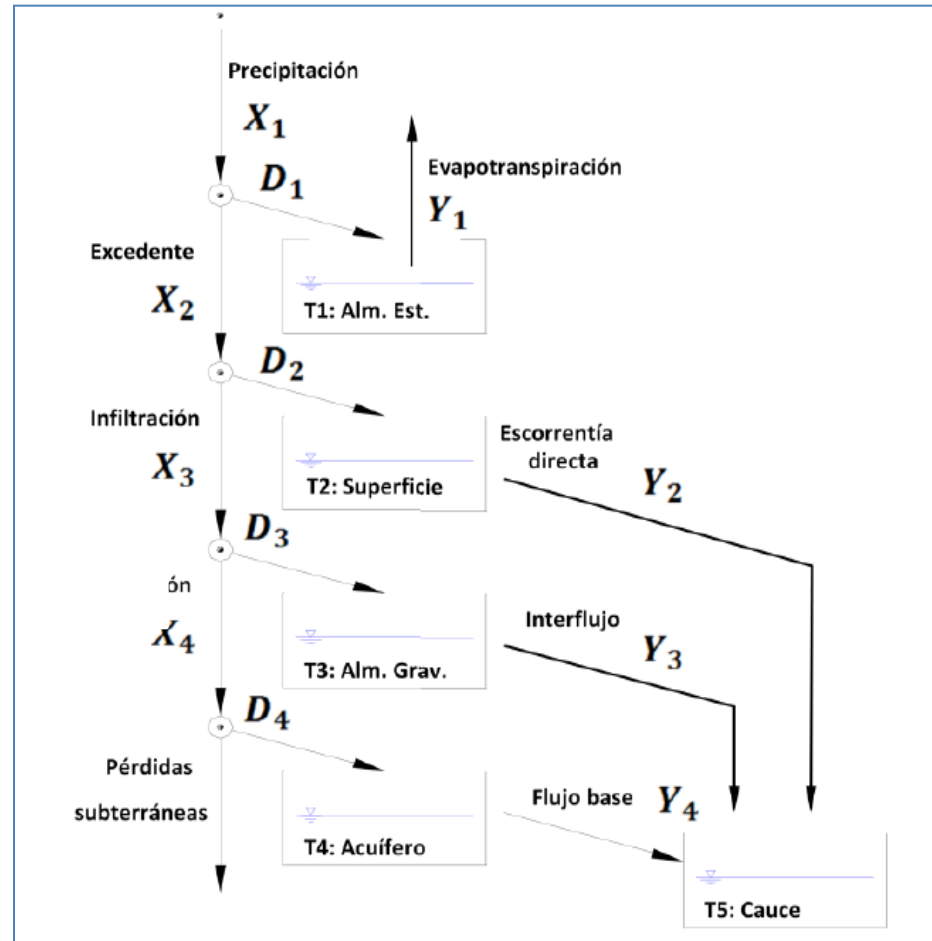
Prec. Máxima Mensual = 215.6 mm



Prec. Media Anual = 664.8 mm

# ESQUEMA CONCEPTUAL

**LU3:**  
Conceptual  
Hydrological  
Lumped  
Model



# PARÁMETROS Y CONDICIONES A CALIBRAR

---

## Parámetro

---

Almacenamiento capilar ( $H_u$ )

Capacidad de infiltración gravitacional ( $K_s$ )

Capacidad de percolación ( $K_p$ )

Tiempo medio de residencia del flujo superficial ( $T_1$ )

Tiempo medio de residencia del flujo subsuperficial ( $T_2$ )

Tiempo medio de residencia del flujo base ( $T_3$ )

Factor corrector de la ETO (FC)

---

+ almacenamientos iniciales de los cuatro tanques

# FUNCIÓN OBJETIVO

Recomendaciones de Legates y McCabe (1999)

- Un indicador del error.
- Un índice adimensional cuantificador de la bondad del ajuste.
- Un procedimiento gráfico.

$$\text{Error (\%)} = \frac{\sum Q_{obs_i} - \sum Q_{sim_i}}{\sum Q_{obs_i}} * 100$$

$$Nash = \frac{\sum (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2 - \sum (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

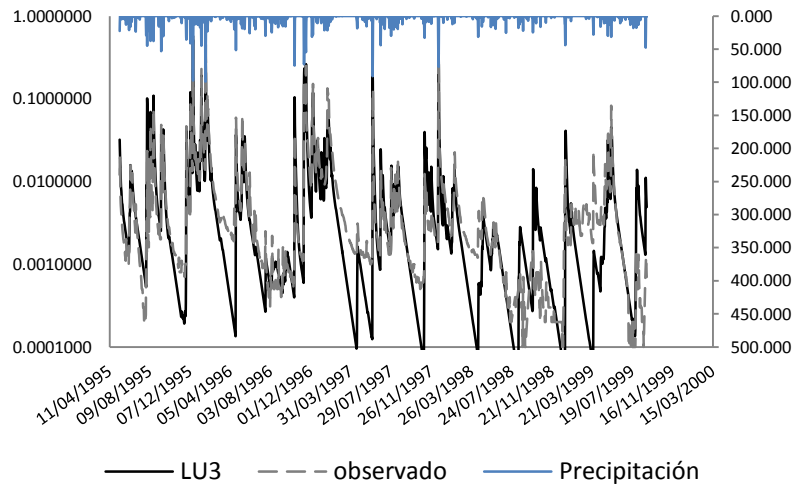
# RANGO DE VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS

Necesario hacer un análisis de sensibilidad local.

Parámetro	Valor mín.	Valor máx.
Almacenamiento capilar ( $H_u$ )	5	600
Capacidad de infiltración gravitacional ( $K_s$ )	5	50
Capacidad de percolación ( $K_p$ )	1	20
Tiempo medio de residencia del flujo superficial ( $T_1$ )	1	2
Tiempo medio de residencia del flujo subsuperficial ( $T_2$ )	1.5	20
Tiempo medio de residencia del flujo base ( $T_3$ )	5	100
Factor corrector de la ETP (FC)	0.7	1

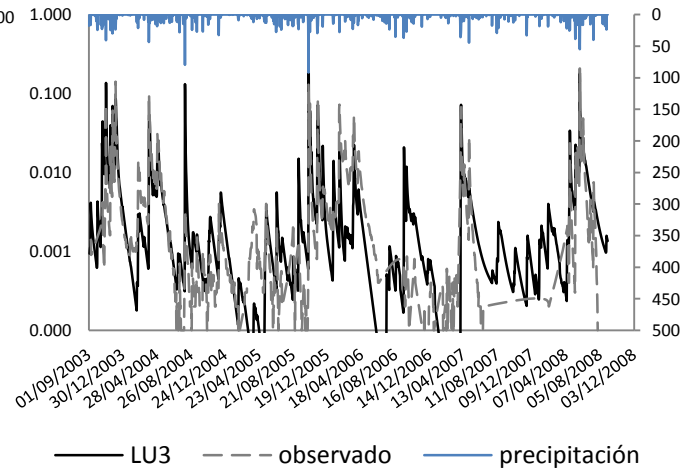


# RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN



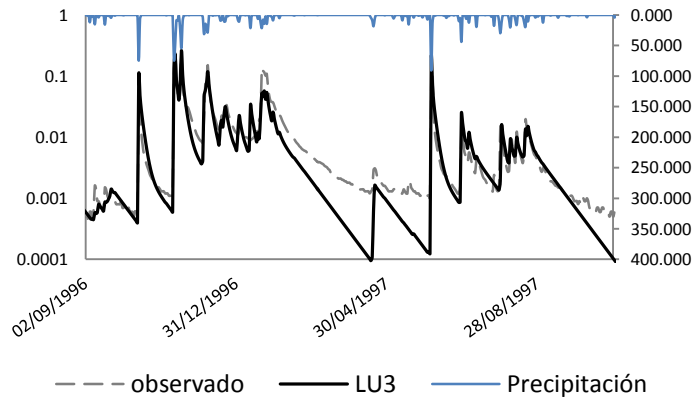
Nash = 0.861  
Error Vol. (%) = 14.33 %

Nash = 0.501  
Error Vol. (%) = 2.39 %



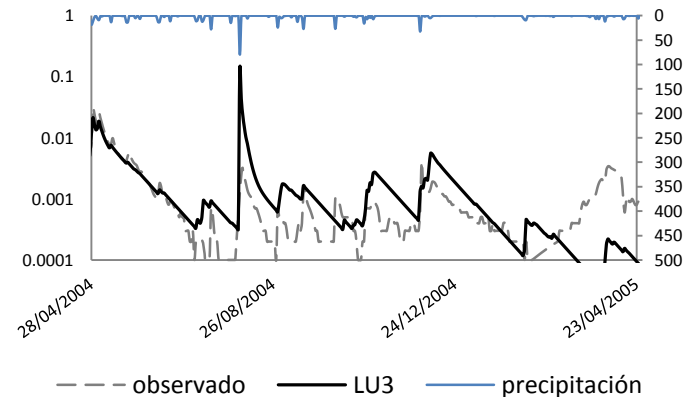
# RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Problema con las curvas de recesión:



Sobrevaloración en el período seco.

Infravaloración en el período húmedo.

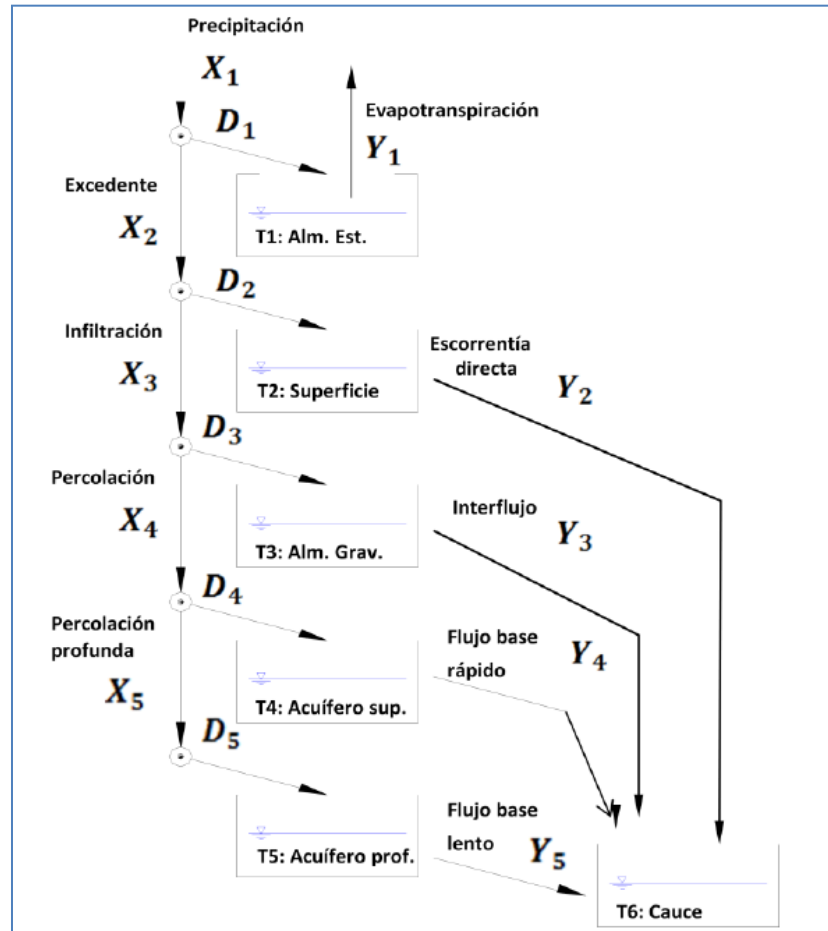


# RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Problema con las curvas de recesión:

- Los resultados obtenidos con el modelo LU3 apuntan a un diferente comportamiento de la respuesta hidrológica de la cuenca en época seca y época húmeda.
- Posible formación de un acuífero colgado.
- El modelo LU4 surge para tratar de plasmar aquellas situaciones en las que parece haber una desconexión de la zona permanentemente saturada mientras que sí puede darse una saturación de la parte más superficial.

# ESQUEMA CONCEPTUAL



**LU4:**  
Conceptual  
Hydrological  
Lumped  
Model

# PARÁMETROS Y CONDICIONES A CALIBRAR

---

## Parámetro

---

Almacenamiento capilar ( $H_u$ )

Capacidad de infiltración gravitacional ( $K_s$ )

Capacidad de percolación ( $K_p$ )

Tiempo medio de residencia del flujo superficial ( $T_1$ )

Tiempo medio de residencia del flujo subsuperficial ( $T_2$ )

Tiempo medio de residencia del flujo base ( $T_3$ )

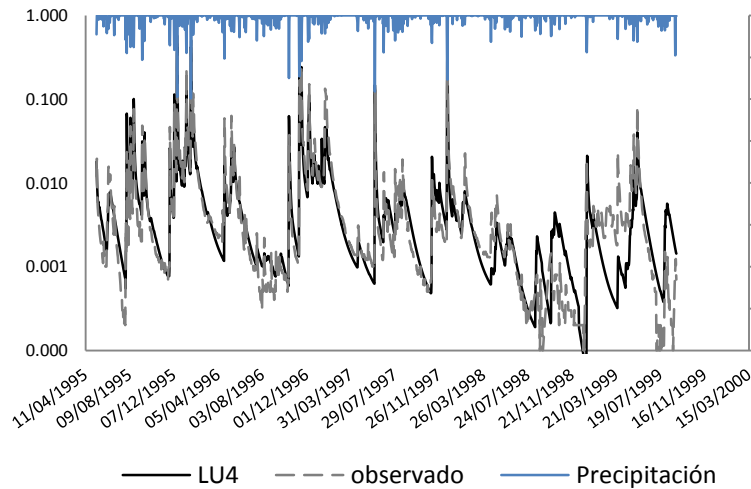
**Tiempo medio de residencia del flujo base lento ( $T_4$ )**

**Umbral de activación del tanque lento ( $H_m$ )**

Factor corrector de la ETP ( $FC$ )

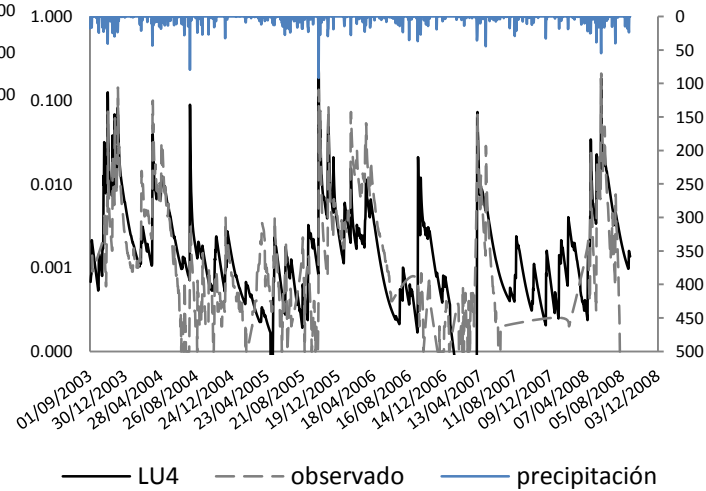
---

# RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN



Nash = 0.872  
Error Vol. (%) = 8.98 %

Nash = 0.601  
Error Vol. (%) = -11.33 %



# RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN

## Período 1 Validación

Modelo	Nash	Error en volumen
LU3	0.782	27.4%
LU4	0.826	21.7%

## Período 2 Validación

Modelo	Nash	Error en volumen
LU3	0.335	54.7%
LU4	0.537	47.3%

# COMPARACIÓN DE MODELOS

Comparación del valor de los parámetros y del balance hídrico

**LU3:**  
Conceptual  
Hydrological  
Lumped  
Model

Flujo	% Participación período 1	%Participación período 2
Escorrentía directa	22.37	10.08
Interflujo	<b>47.00</b>	<b>48.63</b>
Flujo base	30.63	41.29

**LU4:**  
Conceptual  
Hydrological  
Lumped  
Model

Flujo	% Participación período 1	%Participación período 2
Escorrentía directa	22.16	8.05
Interflujo	<b>27.40</b>	<b>27.49</b>
Flujo base superficial	42.13	54.52
Flujo base profundo	8.31	9.95



# COMPARACIÓN DE MODELOS

Comparación del valor de los parámetros y del balance hídrico

**LU3:**  
Conceptual  
Hydrological  
Lumped  
Model

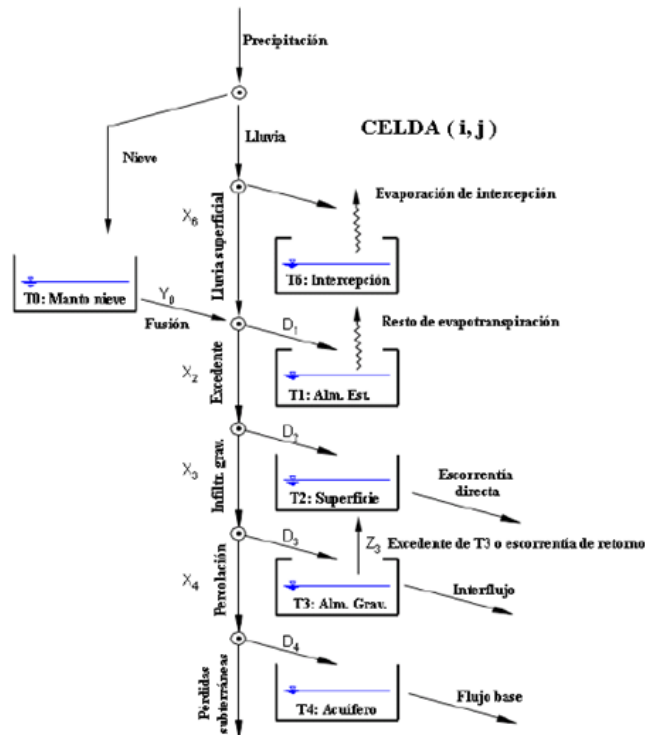
Flujo	% Participación período 1	%Participación período 2
Escorrentía directa	22.37	10.08
Interflujo	47.00	48.63
Flujo base	30.63	41.29

**LU4:**  
Conceptual  
Hydrological  
Lumped  
Model

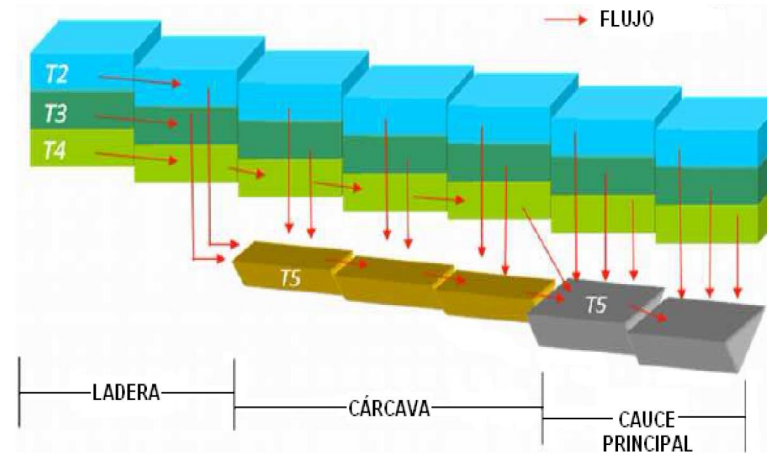
Flujo	% Participación período 1	%Participación período 2
Escorrentía directa	22.16	8.05
Interflujo	27.40	27.49
Flujo base superficial	<b>42.13</b>	<b>54.52</b>
Flujo base profundo	<b>8.31</b>	<b>9.95</b>

# ESQUEMA CONCEPTUAL

A nivel de celda



Conceptualización horizontal



# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

- Mapas derivados del DEM
- Parámetros geomorfológicos
  - Áreas Umbrales
  - Onda Cinemática Geomorfológica (OCG)
- Mapas de parámetros
  - Tetis\_DHO3
  - Tetis\_DHE3

# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas derivados del DEM:

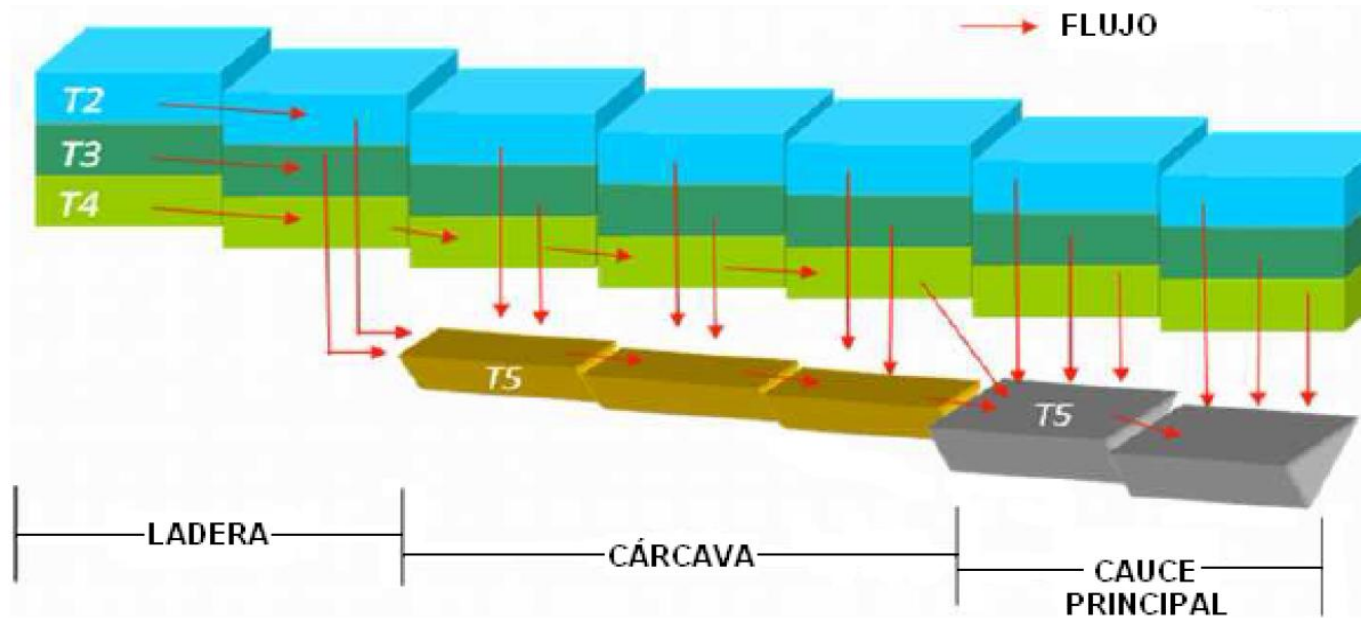
- Modelo de elevación digital
- Mapa de direcciones de flujo
- Mapa de celdas acumuladas
- Mapa de pendientes



# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Parámetros Geomorfológicos:

- Áreas Umbrales
- Onda Cinemática Geomorfológica



# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

## Parámetros Geomorfológicos: Áreas Umbrales

- ➔ Mayor dificultad área umbral del interflujo
- ➔ Estudio de influencia de las áreas umbrales del modelo (detallado en Anejo 7)

ÁREA UMBRAL	VALOR $Km^2$
Flujo Base	0.0506
Interflujo	0.0028

# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

**Tetis\_DH03:**  
Distribución  
de  
parámetros  
homogénea.

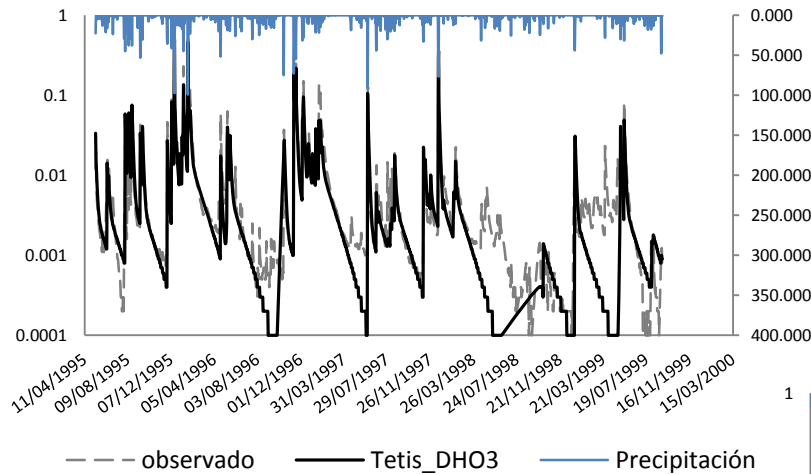
- **Mapa de velocidad de la escorrentía directa**

$$v = 1.414 * \sqrt{\text{pendiente } (m/m)}$$

- Mapa del factor de vegetación  $\lambda v$
- Mapa de interceptación máxima  $Imax$
- Mapa de almacenamiento hídrico  $Hu$
- Mapa de conductividades (vertical, horizontal, superficial y profunda

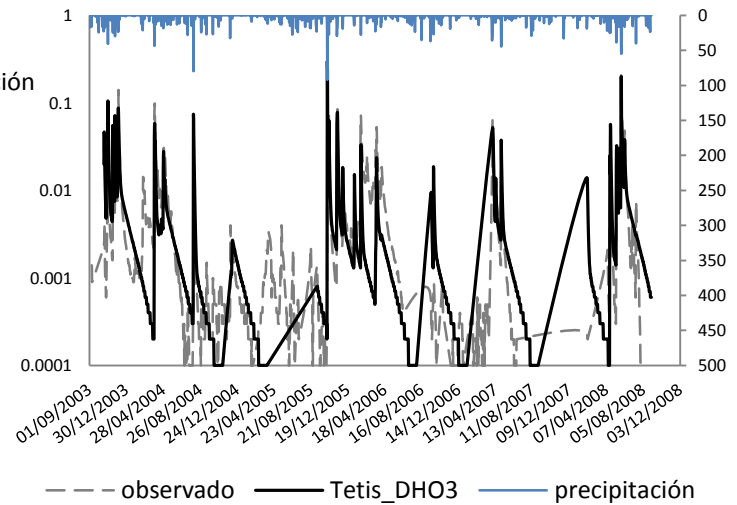
Mapa de 1

# RESULTADOS OBTENIDOS



Nash = 0.822  
 Error Vol. (%) = 10.11 %

Nash = 0.594  
 Error Vol. (%) = -15.84 %





# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

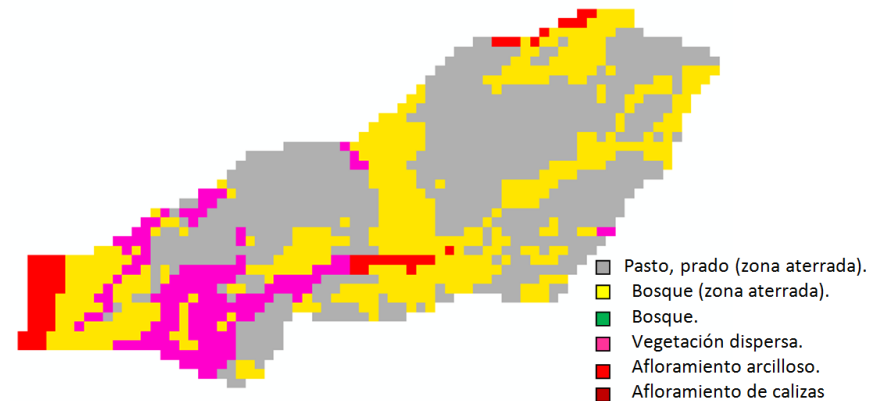
- Mapa de velocidad de la escorrentía directa

$$v = 1.414 * \sqrt{\text{pendiente (m/m)}}$$

- Mapa del factor de vegetación  $\lambda_v \rightarrow$  mapa usos suelo

Tetis\_DHE3:  
Distribución  
de  
parámetros  
heterogénea

Unidad	$\lambda_v$
Bosque de pino albar	1
Pasto natural	0.9
Vegetación Escasa	0.3
Afloramientos	0.2



# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

- Mapa de interceptación máxima

La interceptación es la parte de la precipitación que es interceptada por objetos superficiales como la cubierta vegetal o los tejados

Unidad	Interceptación (mm)
Bosque de pino albar	9
Pasto natural	3
Vegetación Escasa	0 aprox.
Afloramientos	0 aprox.

# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

- Mapa de almacenamiento hídrico  $H_u$

El almacenamiento estático máximo ( $H_u$ ) es la cantidad máxima de agua (en mm) que se puede acumular en el tanque estático. Este tanque representa el agua que transita por la cuenca y que sólo sale de ella por evapotranspiración, por lo tanto no contribuye a la escorrentía.

- ➔ Almacenamiento debido a la cubierta vegetal
- ➔ Almacenamiento en depresión
- ➔ Agua retenida por las fuerzas capilares en la parte superior del suelo

# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

- Mapa de almacenamiento hídrico  $H_u$ 
  - ➔ Almacenamiento debido a la cubierta vegetal

Unidad	Almacenamiento (mm)
Bosque de pino albar	4.5
Pradera natural	6
Vegetación Escasa	0

# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

- Mapa de almacenamiento hídrico  $H_u$   
➔ Almacenamiento en depresión

NECESARIO TENER EN CUENTA EL ATERRAZAMIENTO

**Terrazas pequeñas:**

Dimensiones menores al tamaño de celda.

**Terrazas grandes:**

Dimensiones mayores al tamaño de celda



# DE LOS DATOS

to hídrico Hu

o al almacenamiento en

TA EL ATERRAZAMIENTO

ñaño de celda.

ñaño de celda

Sistema de drenaje propio

# ION DE LOS DATOS

mientamiento hídrico Hu



**Terrazas pequeñas**  
Dimensiones

**Terrazas grandes**  
Dimensiones



Encharcamiento típico de las terrazas pequeñas

# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

- Mapa de almacenamiento hídrico  $H_u$ 
  - ➔ Almacenamiento debido al almacenamiento en depresión

NECESARIO TENER EN CUENTA EL ATERRAZAMIENTO

**Terrazas pequeñas** ➔ **Almacenamiento pendiente cero**

Dimensiones menores al tamaño de celda

**Terrazas grandes:**

Dimensiones mayores al tamaño de celda



# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

- Mapa de almacenamiento hídrico  $H_u$ 
  - ➔ Agua retenida por las fuerzas capilares en la parte superior del suelo

A determinar:

- Capacidad de campo y punto de marchitez
- Profundidad efectiva
  - Profundidad efectiva de raíces
  - Profundidad del suelo

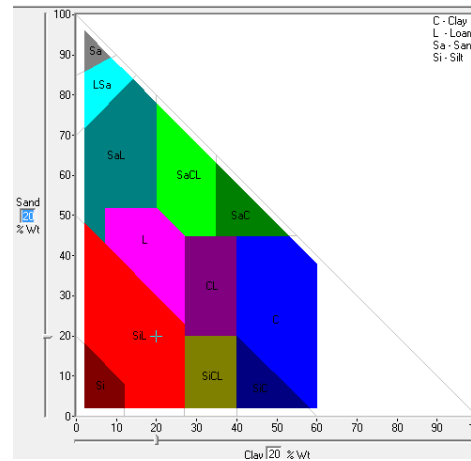
# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

- Mapa de almacenamiento hídrico  $H_u$ 
  - ➔ Agua retenida por las fuerzas capilares en la parte superior del suelo

A determinar:

- Capacidad de campo y punto de marchitez



# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

- Mapa de almacenamiento hídrico  $H_u$



Agua retenida por las fuerzas capilares en la parte superior del suelo

A determinar:

- **Profundidad efectiva de raíces**

Tipo de vegetación	Profundidad efectiva de raíces (m)
Pino Albar ( <i>pinus sylvestris</i> )	1.5
Pradera natural	0.5
Vegetación escasa	0.5
Afloramientos	0

# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

- Mapa de almacenamiento hídrico  $H_u$

➔ Agua retenida por las fuerzas capilares en la parte superior del suelo

A determinar:

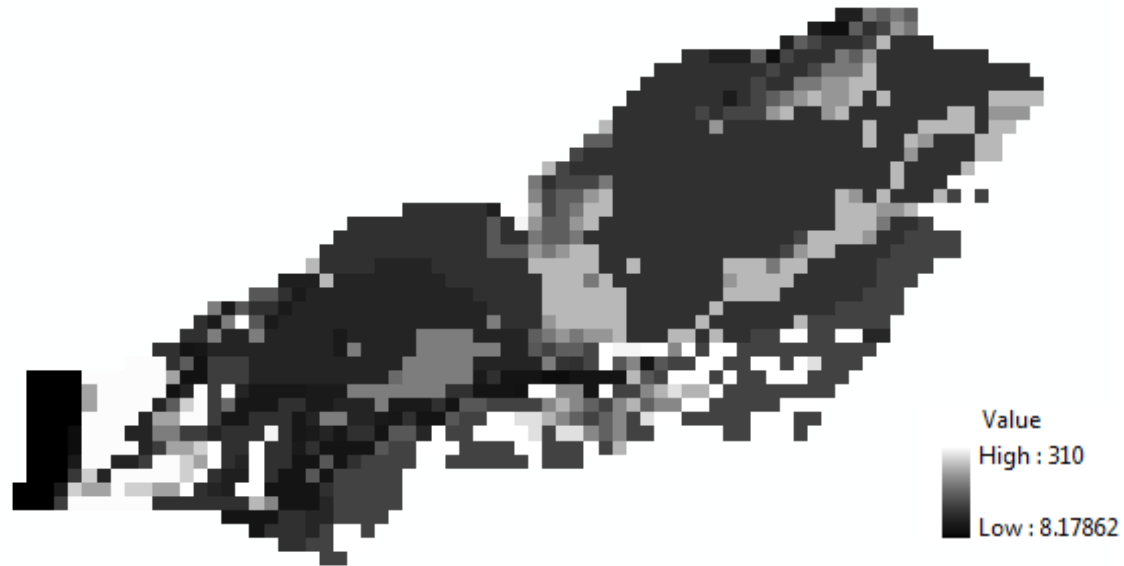
- **Profundidad del suelo → Dato**



# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

- Mapa de almacenamiento hídrico Hu



# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

- Mapa de conductividades

VERTICALES

- Capacidad de infiltración gravitacional ( $K_s$ )
- Tasa de percolación ( $K_p$ )
- Tasa de percolación profunda ( $K_{pp}$ ) → Pérdidas nulas

HORIZONTALES

- Conductividad horizontal interflujo ( $K_{ss}$ )
- Conductividad horizontal flujo base ( $K_{sa}$ )

# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

- Mapa de conductividades

VERTICALES

- **Capacidad de infiltración gravitacional ( $K_s$ )**
- **Tasa de percolación ( $K_p$ )**
- Tasa de percolación profunda ( $K_{pp}$ )

NECESARIO:

- ➔ Mapa de edafología
- ➔ Análisis de las muestras a través del programa SWC

# PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Mapas de parámetros:

- Mapa de conductividades

HORIZONTALES

- **Conductividad horizontal interflujo ( $K_{ss}$ )**
- **Conductividad horizontal flujo base ( $K_{sa}$ )**

MISMA DISTRIBUCIÓN QUE  
CONDUCTIVIDADES VERTICALES

Necesario considerar aterramiento:  
Terrazas pequeñas siempre más húmedas. *(Lloréns, 2002)*

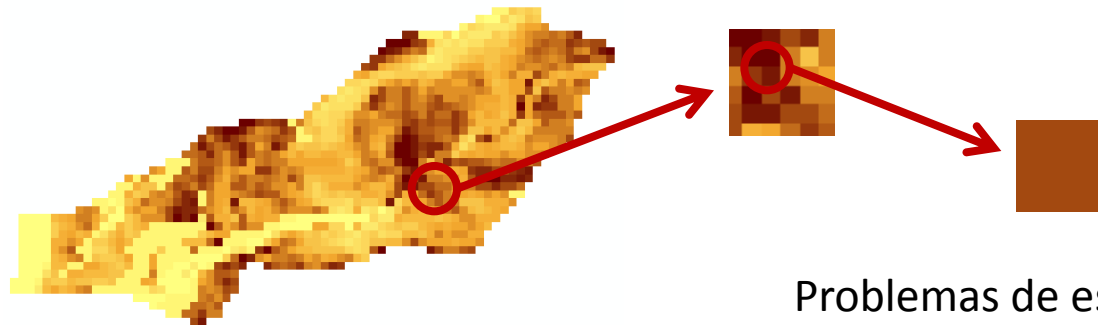
➡ Valor original / 10



# FASE DE CALIBRACIÓN

Parámetro efectivo:

- Comportamiento de un área finita o volumen finito
- No pueden ser medidos puntualmente
- No necesitan estar relacionados con medidas puntuales



# FASE DE CALIBRACIÓN


Parámetro efectivo en TETIS:

$$\theta_{i,j}^* \approx R_i \theta_{i,j}, \quad j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, p$$

$\theta_{i,j}^*$  Parámetro efectivo

$R_i$  Factor corrector

$\theta_{i,j}$  Parámetro estimado



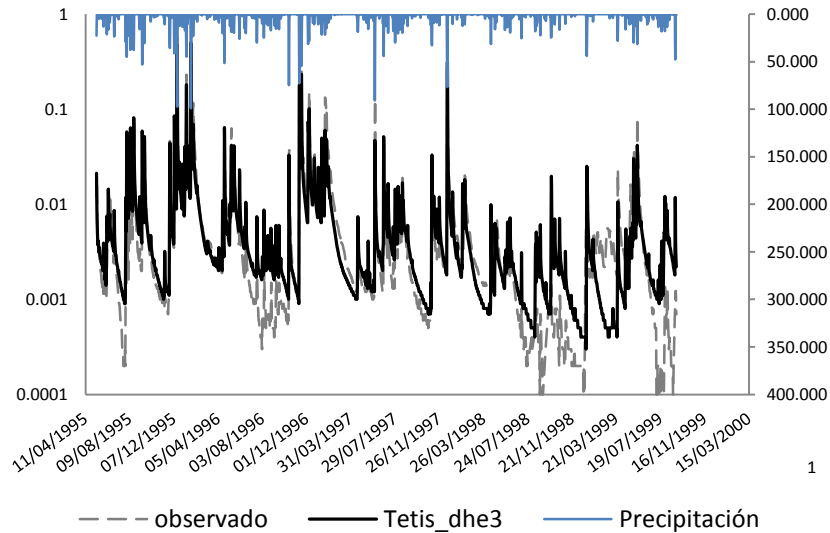
Errores conceptuales del modelo  
Errores en los datos de entrada  
Efectos de escala espacial y temporal

# FASE DE CALIBRACIÓN

Factores correctores a calibrar:

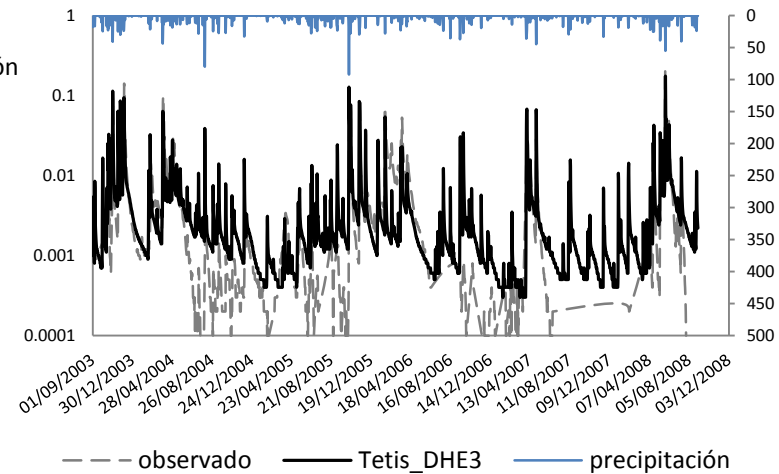
- FC-1: Almacenamiento Estático
- FC-2: Evaporación
- FC-3: Infiltración
- FC-4: Escorrentía directa
- FC-5: Percolación
- FC-6: Interflujo
- FC-7: Pérdidas Subterráneas
- FC-8: Flujo Base
- FC-9: Velocidad del flujo

# RESULTADOS OBTENIDOS



Nash = 0.831  
Error Vol. (%) = 11.30 %

Nash = 0.670  
Error Vol. (%) = -16.72%



# FASE DE VALIDACIÓN

## Período 1 Validación

Modelo	Nash	Error en volumen
Tetis_DHO3	0.767	14.9%
Tetis_DHE3	0.812	21.5%

## Período 2 Validación

Modelo	Nash	Error en volumen
Tetis_DHO3	0.550	35.3%
Tetis_DHE3	0.623	32.4%

# COMPARACIÓN DE MODELOS

- Análisis Multicriterio: Óptimo de Pareto
  - Procedimiento seguido
  - Comprobación de la solución de compromiso
  - Comparación de los resultados de cada modelo

# COMPARACIÓN DE MODELOS

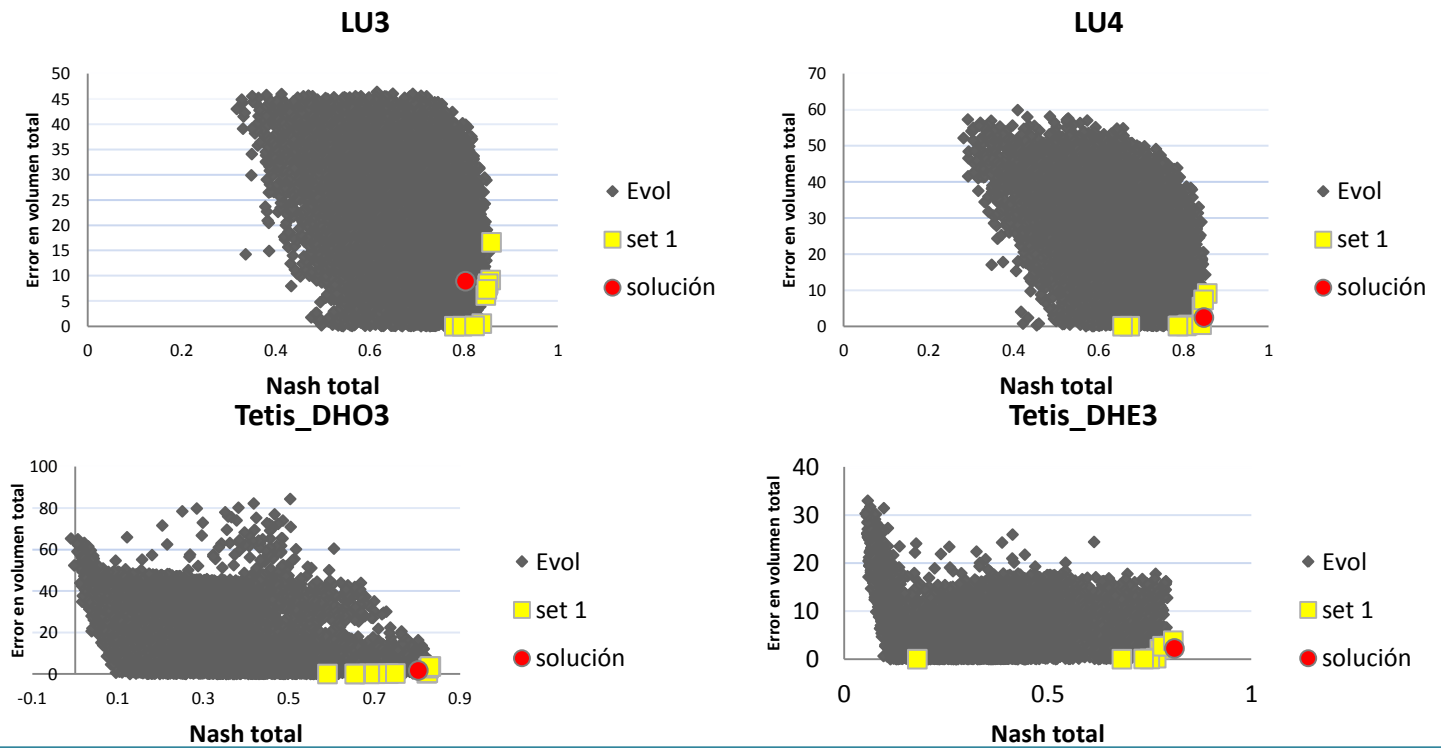
## Análisis Multicriterio: Óptimo de Pareto

- Procedimiento seguido
  - ➔ Generación de 10,000 simulaciones de Montecarlo
  - ➔ Valoración de todos los criterios establecidos
  - ➔ Creación del ranking de Pareto
  - ➔ Representación gráfica de los resultados

# COMPARACIÓN DE MODELOS

## Análisis Multicriterio: Óptimo de Pareto

- Comprobación de la solución de compromiso

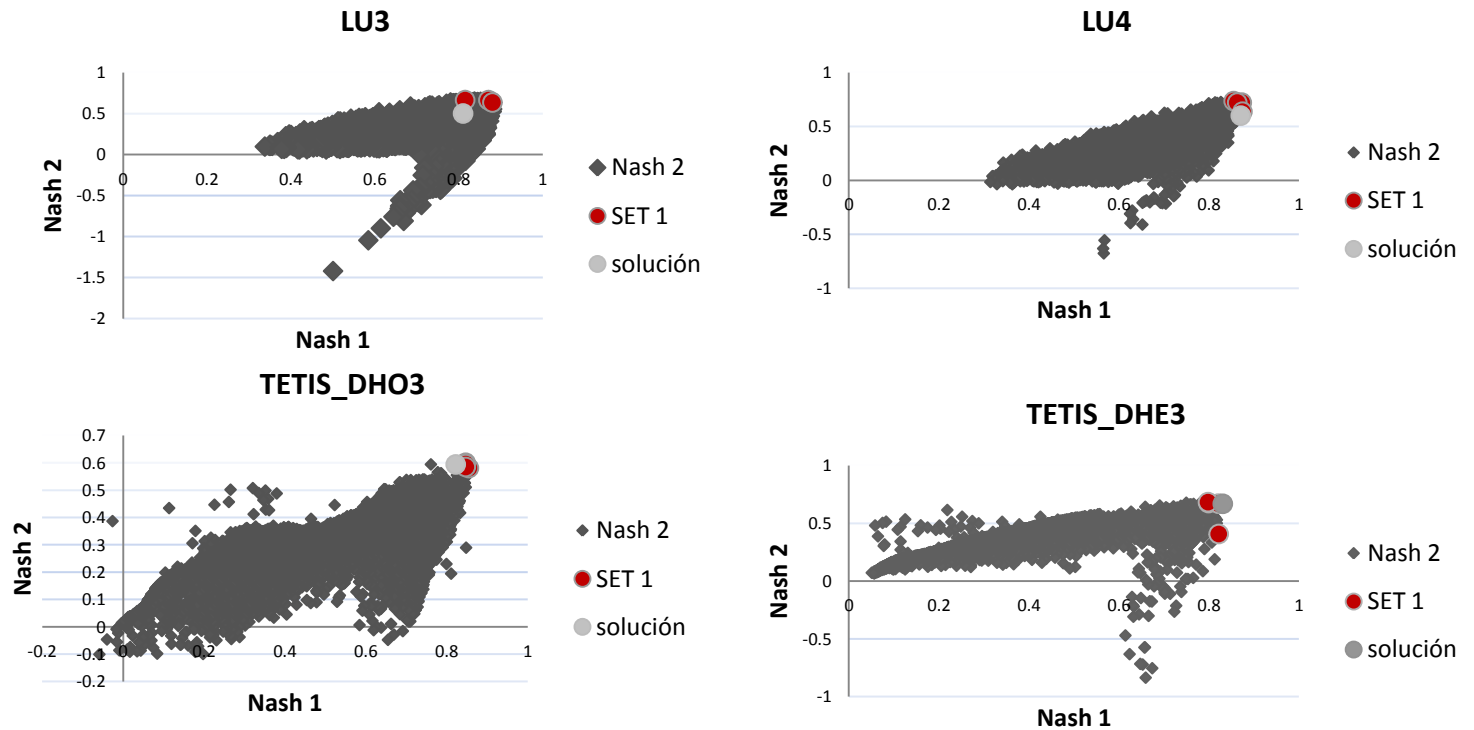




# COMPARACIÓN DE MODELOS

## Análisis Multicriterio: Óptimo de Pareto

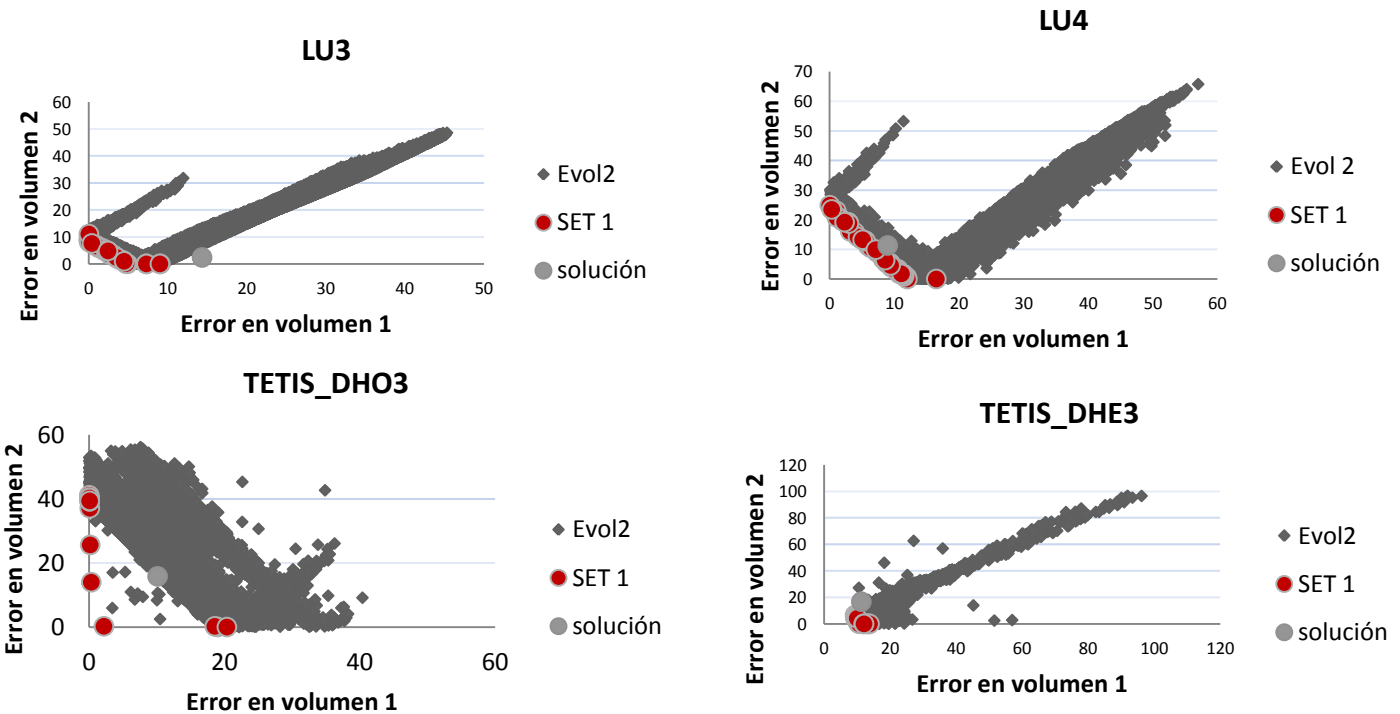
- Comparación de los resultados obtenidos



# COMPARACIÓN DE MODELOS

Análisis Multicriterio: Óptimo de Pareto

- Comparación de los resultados obtenidos



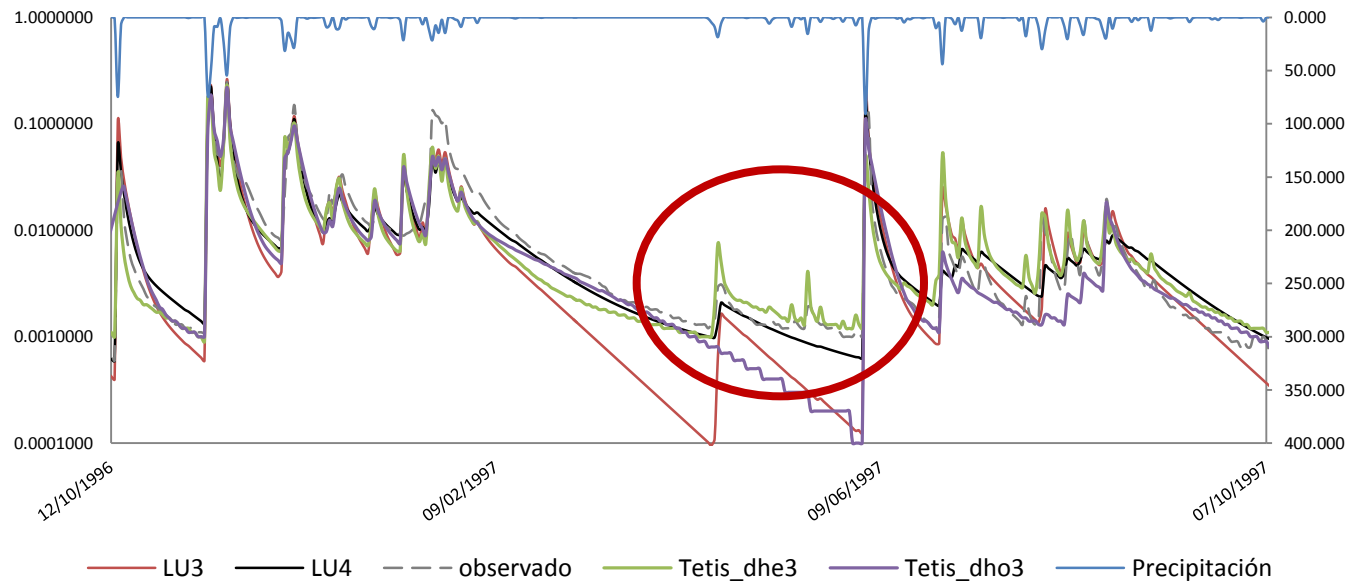
# CONCLUSIONES

- Modelo LU3: Peores resultados
- Modelo LU4: Buenos resultados con necesidad de introducir una no-linealidad en el esquema conceptual.
  - ➔ Flujo base superficial funcionaba como interflujo.
  - ➔ Muy pocas diferencias entre período seco y húmedo

**Quizás la necesidad de introducir el último tanque al modelo agregado original (LU3) se deba mayoritariamente a la incapacidad de los modelos agregados de modelar la distribución espacial de los parámetros y, por tanto, la posibilidad de la existencia de distintas velocidades del interflujo (pues parece ser la clave distintiva) en cada una de las celdas.**

# CONCLUSIONES

- Resultados muy parecidos entre el modelo LU4 y el modelo Tetis\_DHE3 sin necesidad de introducir una cuarta respuesta.
- Mejores resultados en Tetis\_DHE3 que en Tetis\_DHO3.

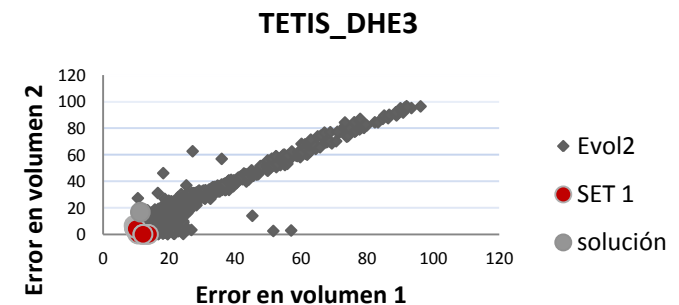
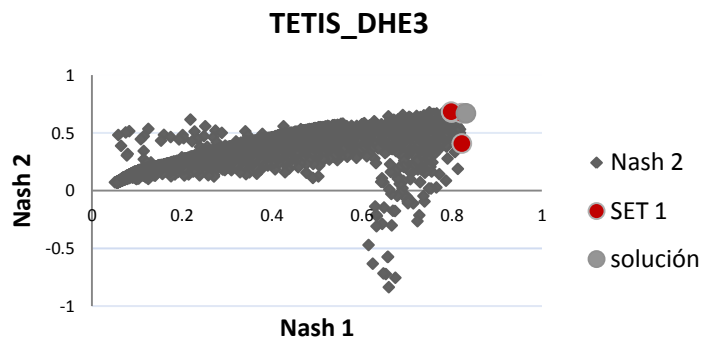


# CONCLUSIONES

- Resultados obtenidos → Muy próximos al óptimo de Pareto
- Modelo Tetis\_DHE3 :

➔ Recta creciente con pendiente de 45°

➔ Resultados aptos considerando todos los criterios



# Estudio del comportamiento hidrológico no-lineal de una pequeña cuenca Mediterránea. Aplicación del estudio a la cuenca de Can Vila (Cataluña).

Universidad Politécnica de Valencia.  
Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos

Proyecto Final de Carrera.  
Modalidad tipo II

Autor: Guiomar Ruiz Pérez  
Tutor: Félix Francés García  
Co-Tutora: Chiara Medici

