

Modelización hidrológica En cuencas forestales

Francesc Gallart

Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'aigua (IDAEA, CSIC)

Barcelona



1ª parte: teoría

- 1. Para qué sirven los modelos?**
- 2. Que tipos de modelos hay**
- 3. Cómo se parametrizan los modelos**
- 4. Requerimientos indispensables:**
 - Verificación**
 - Estimación de la incertidumbre**

2ª parte: ejemplos

- 1. Zhang et al (1999)**
- 2. SIMPA (Ruiz-García, 1999)**
- 3. Número de Curva (US SCS, 1972)**
- 4. HYLUC (Calder, 2003)**
- 5. TOPBAL (Llorens et al. 2006)**

Para qué sirven los modelos?

Utilidad usual en ingeniería aplicada:

- **Estimar caudales en puntos no aforados**
- **Estimar caudales en *régimen natural***
- ***Rellenar* datos de series temporales incompletas**
- **Obtener series largas sintéticas para estudiar la variabilidad**

Utilidades avanzadas (investigación, Cambio Global)

- **Separar el forzamiento climático en series históricas**
- **Predecir caudales para condiciones cambiantes**
- **Simular aspectos del funcionamiento interno de las cuencas
(áreas contributivas, flujo de base, transpiración vegetal)**
- **Ensayar hipótesis y mejorar el conocimiento de los SH**

Tipos fundamentales de modelos

Tratamiento espacial de la información:

Distribuidos: celdas elementales

Agregados: cuencas o subcuencas

Semidistribuidos: áreas de similaridad hidrológica

Descriptiva: HRUs

analítica: TOPMODEL

Tipos fundamentales de modelos

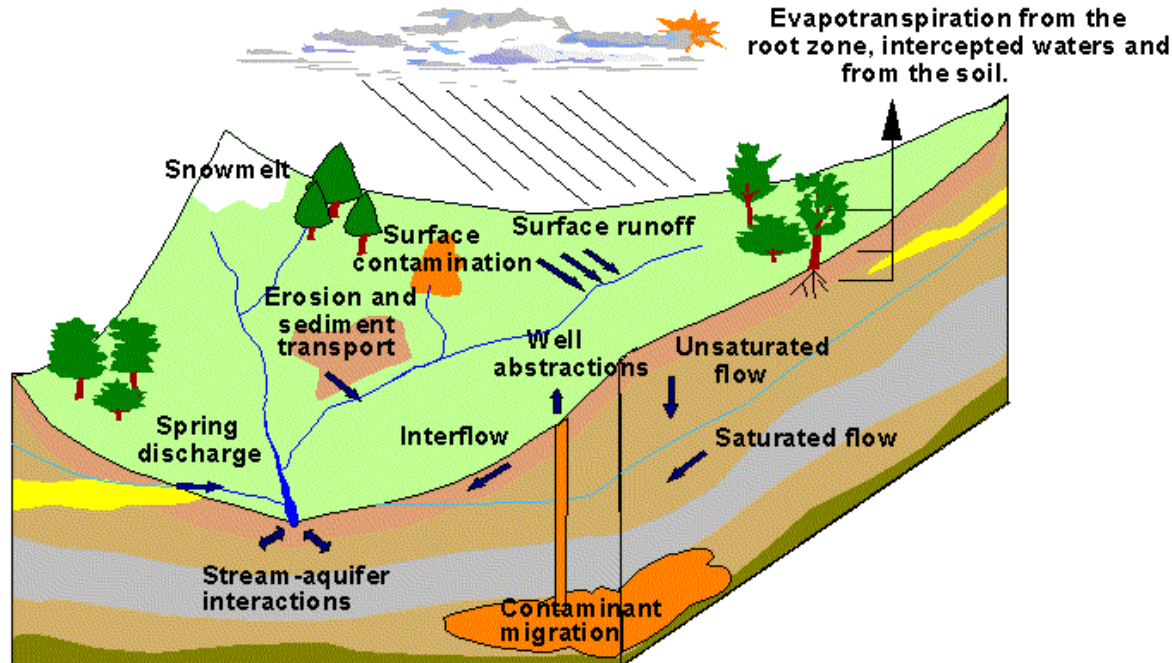
Tipos de ecuaciones y parámetros:

De base física: ecuaciones y parámetros *físicos*

ventaja: transferibles, extrapolables

inconveniente: escala, condiciones de contorno

Processes Represented in SHETRAN Version 4



Tipos fundamentales de modelos

Tipos de ecuaciones y parámetros:

De base física: ecuaciones y parámetros *físicos*

ventaja: transferibles, extrapolables

inconveniente: escala, condiciones de contorno

Conceptuales: intentan reproducir los procesos reales

ventaja: sencillos, eficientes

inconveniente: no transferibles ni extrapolables

TOPMODEL

STANFORD

SACRAMENTO

Tipos fundamentales de modelos

Tipos de ecuaciones y parámetros:

De base física: ecuaciones y parámetros *físicos*

ventaja: transferibles, extrapolables

inconveniente: escala, condiciones de contorno

Conceptuales: intentan reproducir los procesos reales

ventaja: sencillos, eficientes

inconveniente: no transferibles ni extrapolables

Paramétricos: base empírica, parámetros tabulados

ventaja: sencillos, documentados

inconveniente: dependen del operador

Numero de Curva

SWAT

SIMPA

Tipos fundamentales de modelos

Tipos de ecuaciones y parámetros:

De base física: ecuaciones y parámetros *físicos*

ventaja: transferibles, extrapolables

inconveniente: escala, condiciones de contorno

Conceptuales: intentan reproducir los procesos reales

ventaja: sencillos, eficientes

inconveniente: no transferibles ni extrapolables

Paramétricos: base empírica, parámetros tabulados

ventaja: sencillos, documentados

inconveniente: dependen del operador

Empíricos: generalización resultados experimentales

Zhang 1999

Cómo se pueden parametrizar?

De base física: determinaciones experimentales de laboratorio o campo
<imposible en número y escala necesarios>

Conceptuales: calibración (optimización observado-simulado)
<ensayo-error, algoritmos buscadores, Monte-Carlo>

Paramétricos: calibración, tablas + regionalización
<relaciones con atributos cartográficos>

Requerimientos indispensables

Verificación (Klemes, 1986):

‘Split-sample test’

“proxy-basin test”

“differential split-sample test”

“proxi-basin differential split-sample test”

Requerimientos indispensables

Verificación (Klemes, 1986):

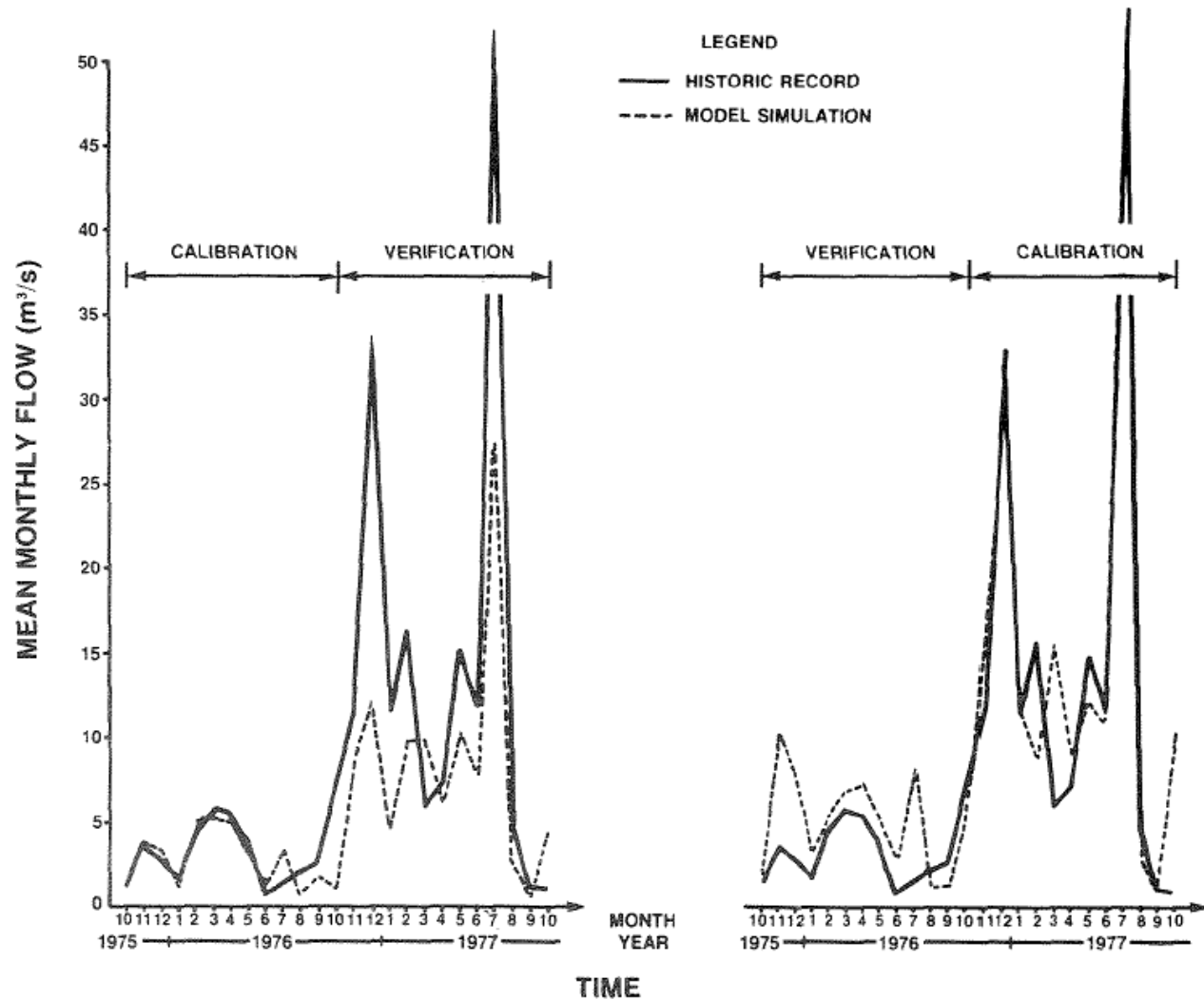
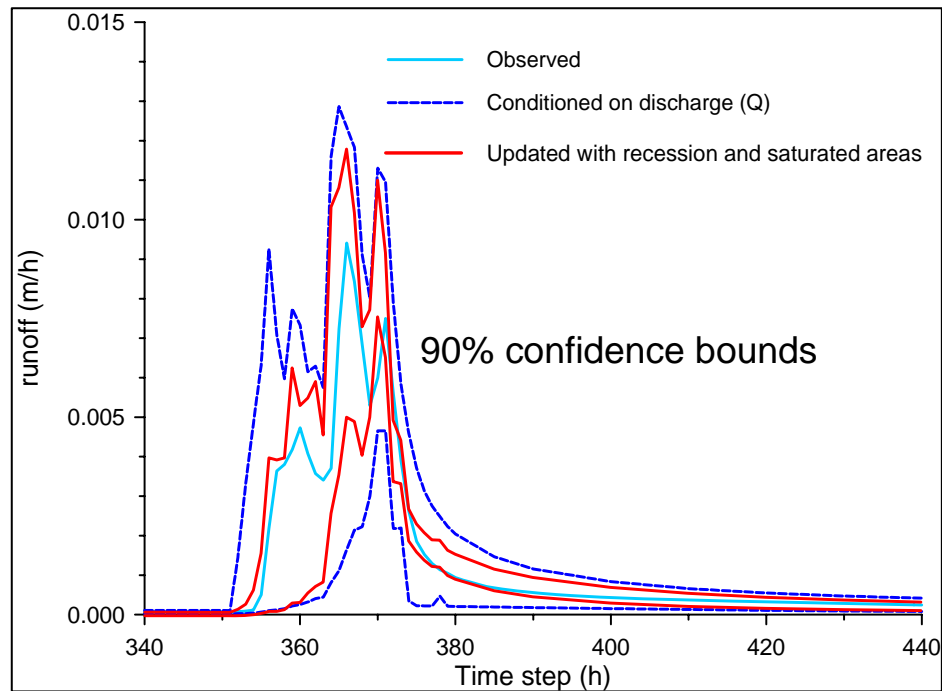


Fig. 1 Example of differential split-sample test for a simulation model for monthly flows using satellite-based information on cloud cover as input; for the Gers River at Layrac, France (Strübing, 1984).

Requerimientos indispensables

Estimación de la incertidumbre asociada a las predicciones (Beven & Binley, 1992; Beven 2006).



Requerimientos indispensables

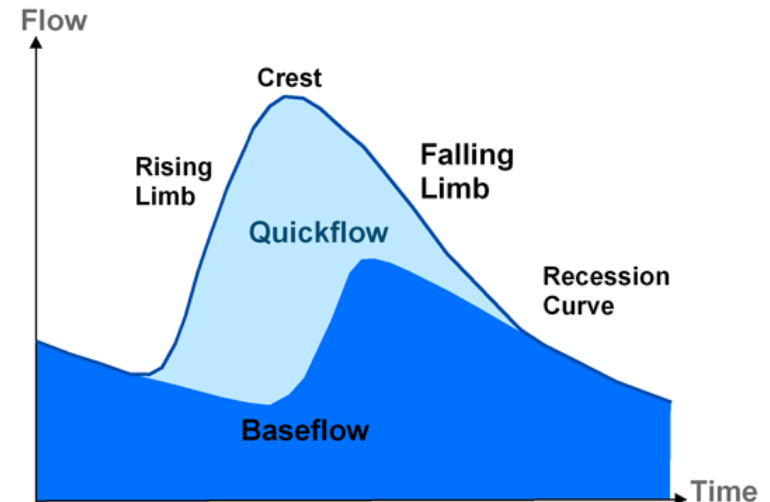
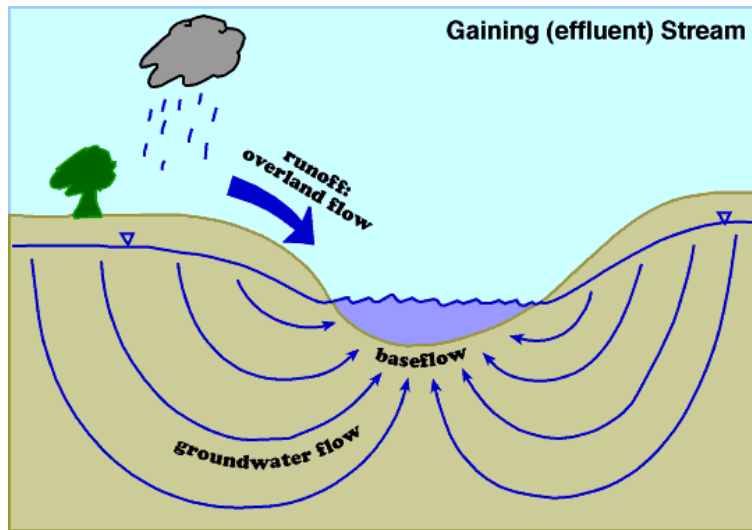
Prevención de la equifinalidad (Beven, 2006)

TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979)

- **basado en razonamiento físico**
- **semidistribuido: similaridad hidrológica - agregado**
- **pocos parámetros – eficiente computacionalmente**
- **escorrentía por saturación – flujo de base (freático somero)**

Nos interesa:

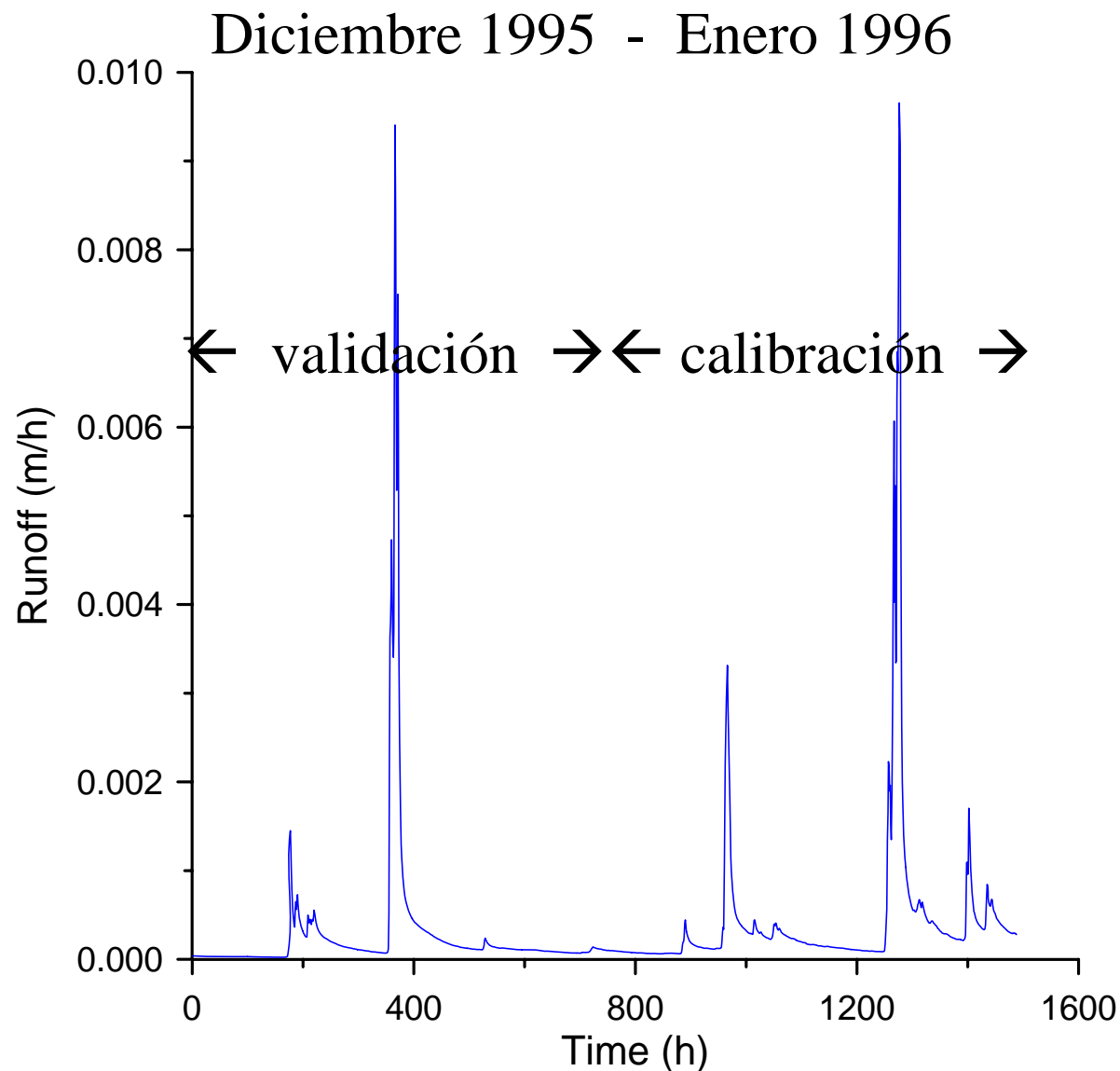
- **simulación de los caudales**
- **simulación del flujo de base (contribución freático somero)**



Requerimientos indispensables

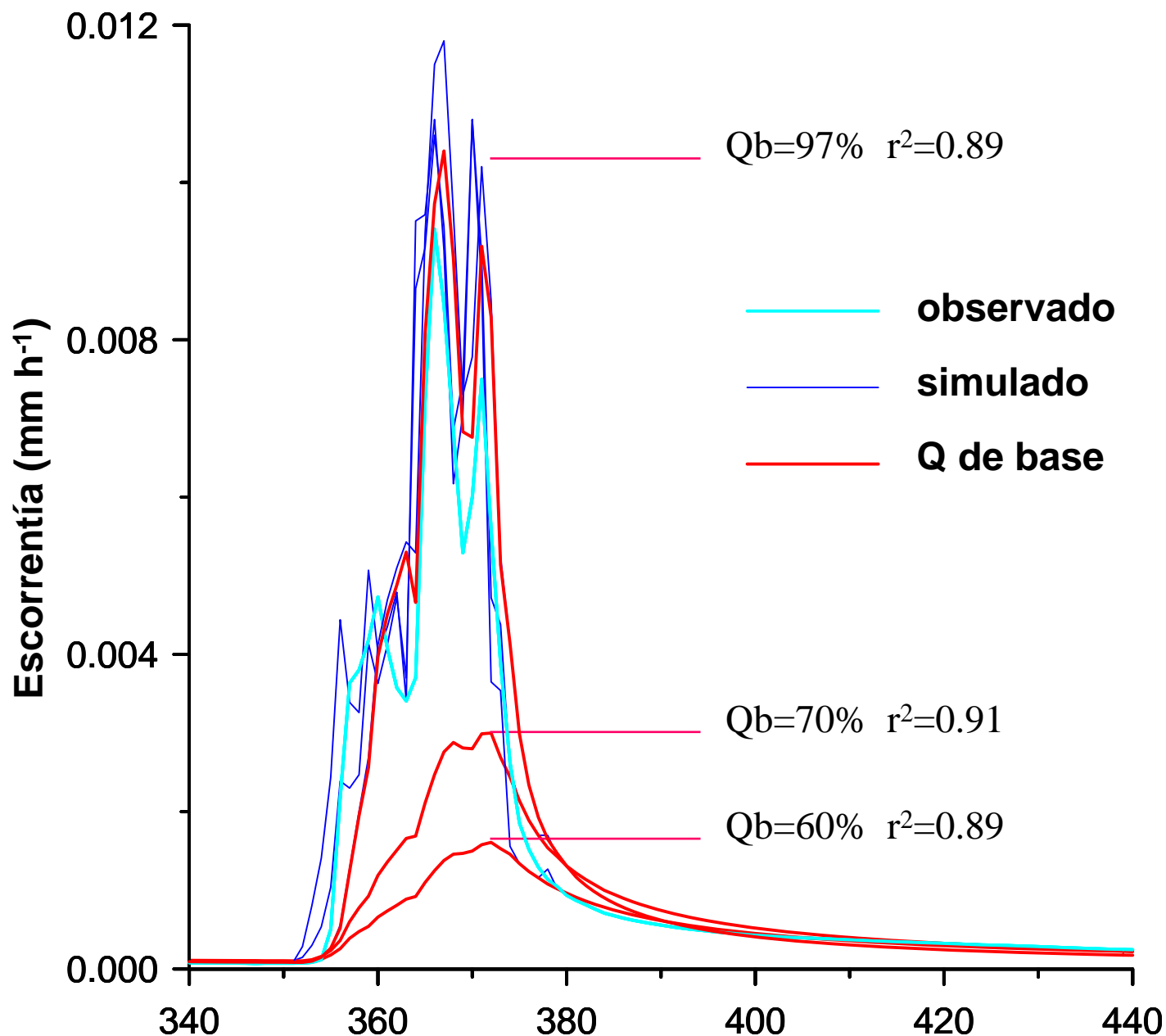
Prevención de la equifinalidad (Beven, 2006)

precipitación (mm)	ETP (mm)	escorrentía (mm)	eficiencia
580	24	547	0.91



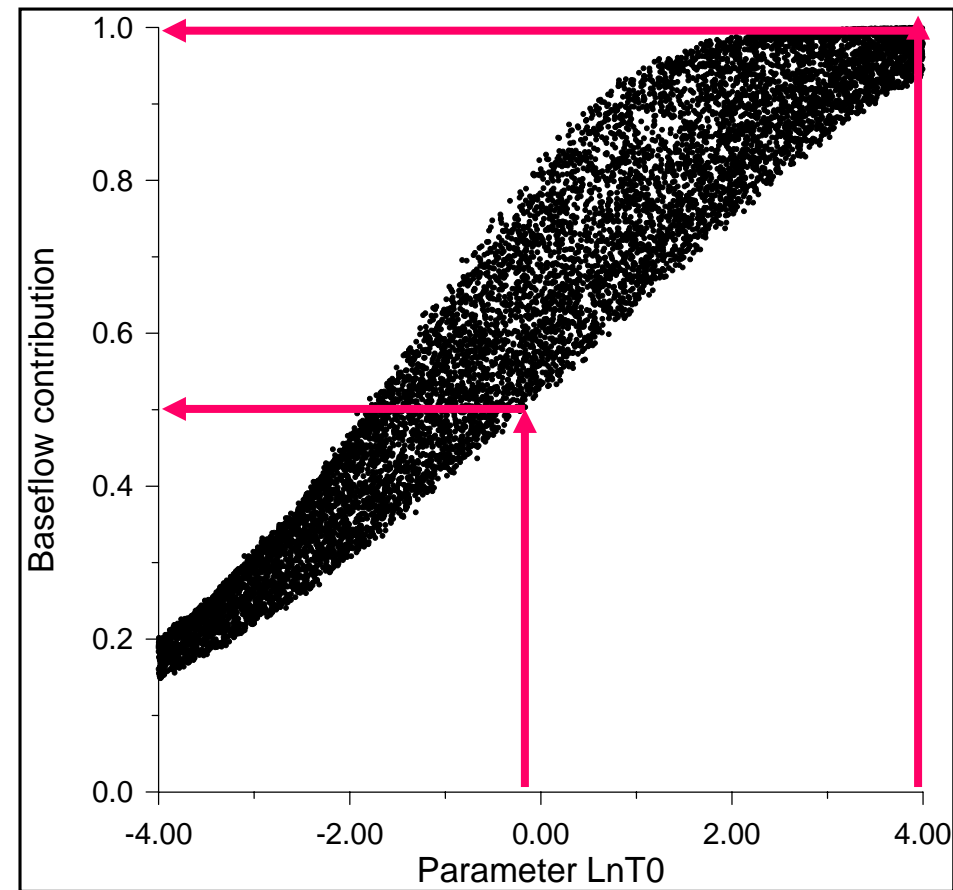
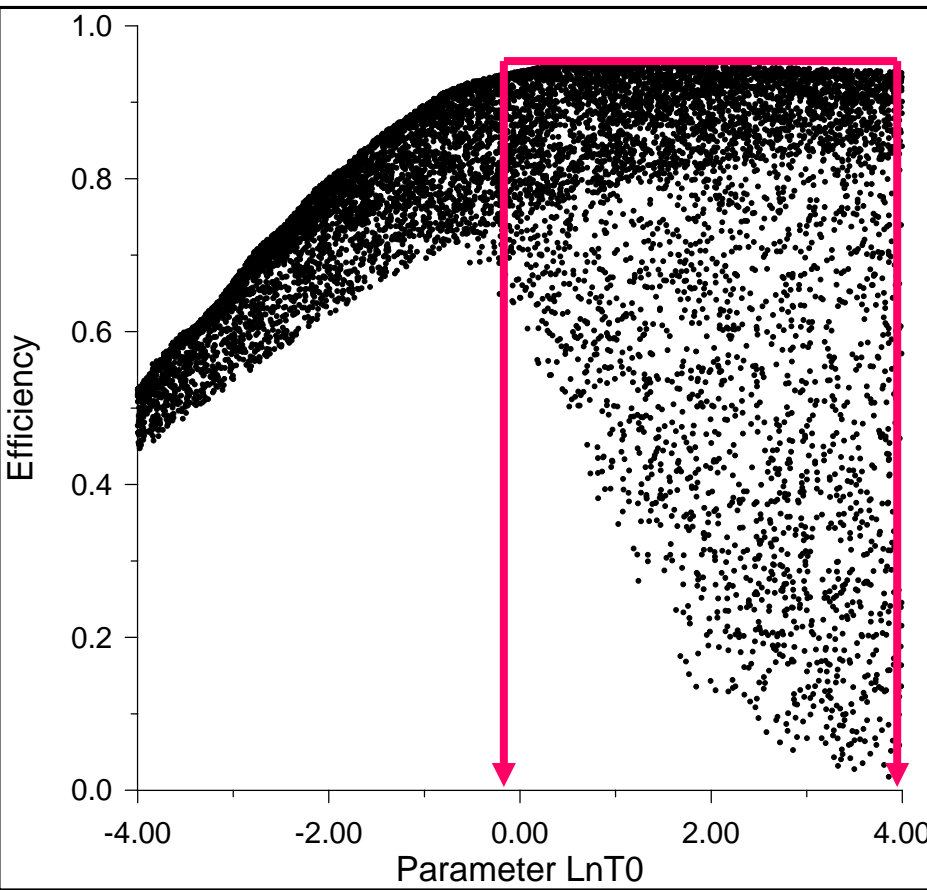
Requerimientos indispensables

Prevención de la equifinalidad (Beven, 2006)



Requerimientos indispensables

Prevención de la equifinalidad (Beven, 2006)



El flujo de base es mucho más sensible al parámetro t_0 que el caudal total.

El caudal es inútil para calibrar la contribución del flujo de base

Gallart et al. 2007

modelos hidrológicos en cambio ambiental:

Postdicción: aplicación a datos históricos para separar el forzamiento

cualquier modelo con calibración aceptable

los resultados dependen de la calidad y variabilidad de los datos

Predicción: aplicación con parámetros futuros

el modelo tiene que permitir modificar los parámetros y reproducir los procesos

imprescindible estudiar la incertidumbre de las predicciones

conveniente comparar con resultados experimentales

elevada incertidumbre de las predicciones climáticas



1ª parte: teoría

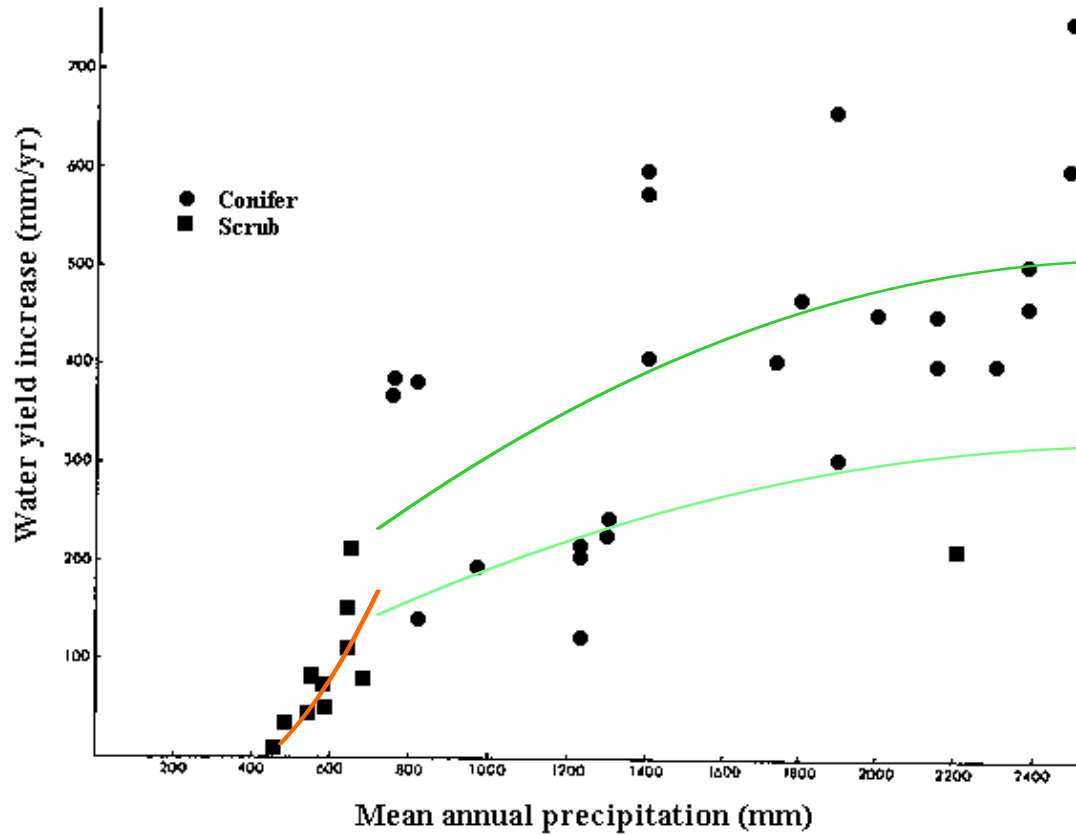
- 1. Para qué sirven los modelos?**
- 2. Que tipos de modelos hay**
- 3. Cómo se parametrizan los modelos**
- 4. Requerimientos indispensables:**
 - Verificación**
 - Estimación de la incertidumbre**

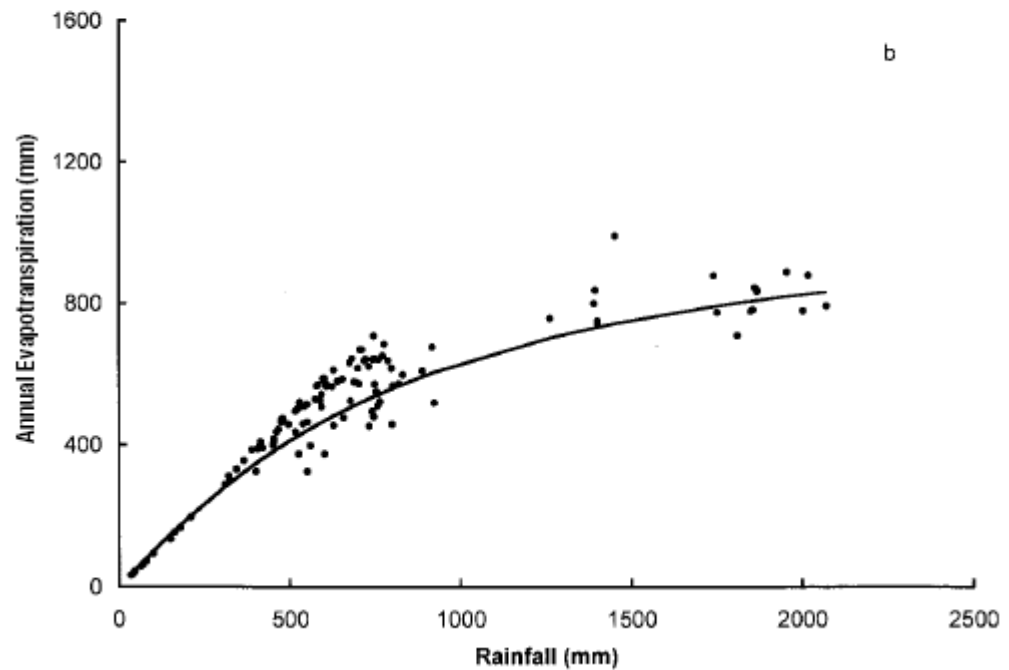
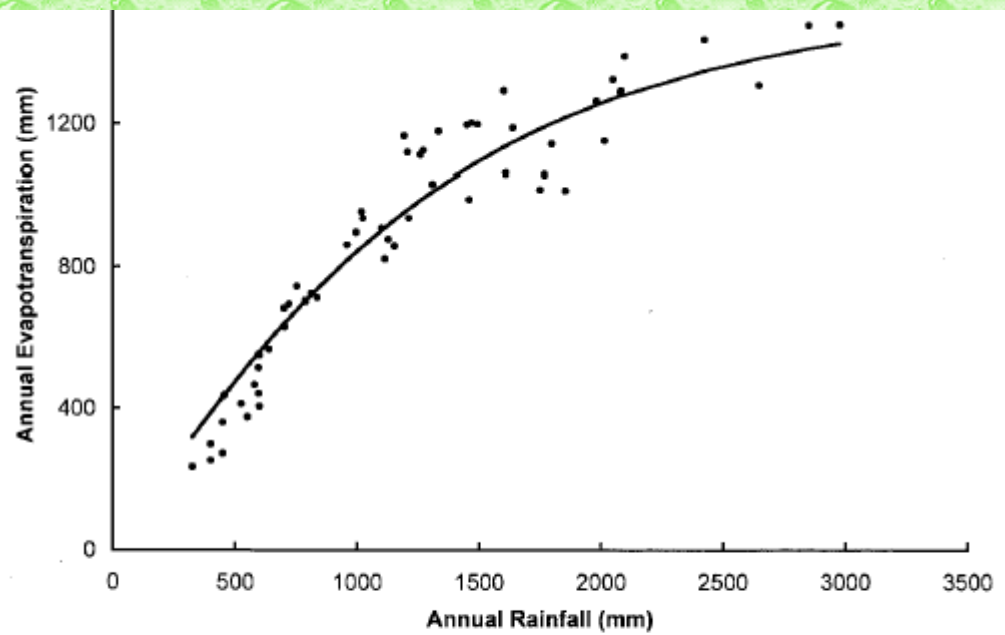
2ª parte: ejemplos

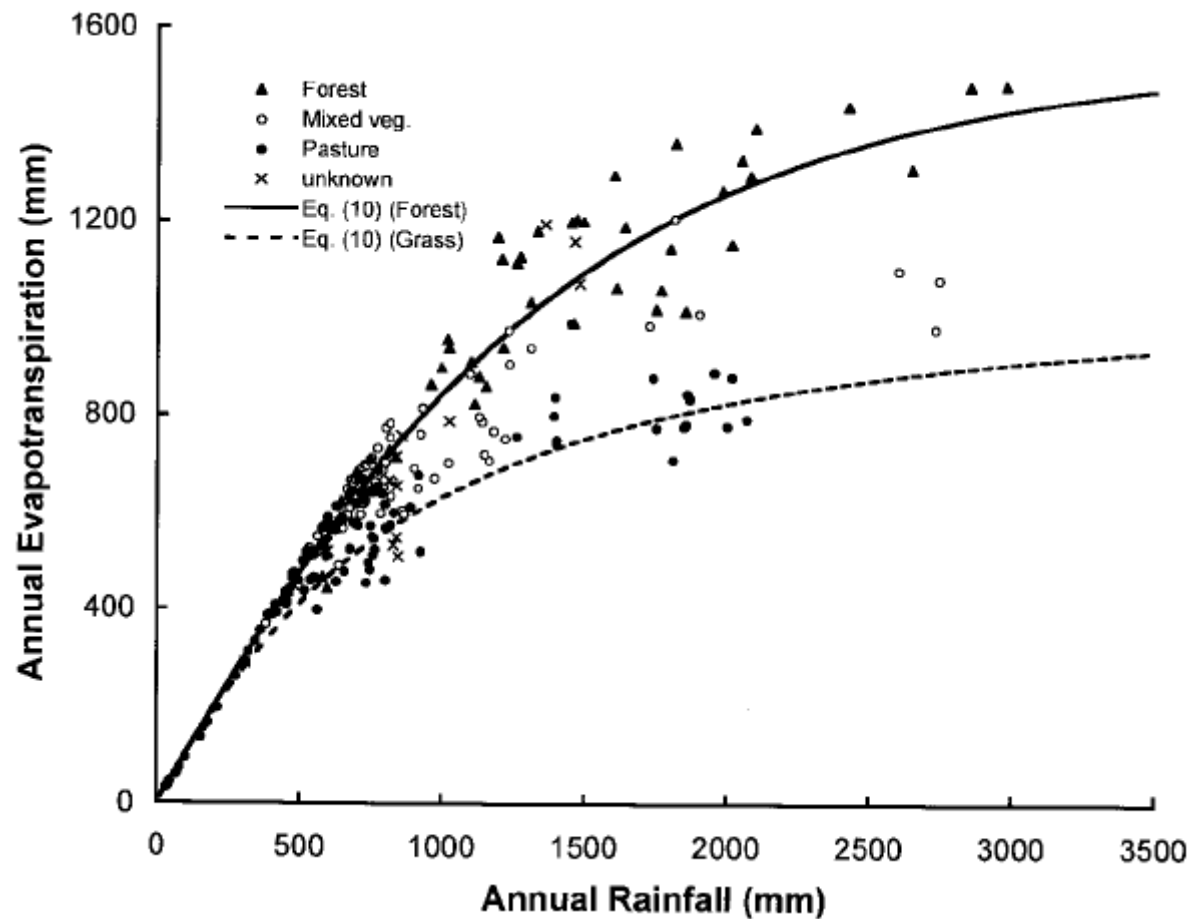
- 1. Zhang et al (1999)**
- 2. SIMPA (Ruiz-García, 1999)**
- 3. Número de Curva (US SCS, 1972)**
- 4. HYLUC (Calder, 2003)**
- 5. TOPBAL (Llorens et al. 2006)**



Bosch Hewlett (1982)







$$ET = P \left\{ \frac{1 + w(E_0 / P)}{1 + w(E_0 / P) + (E_0 / P)^{-1}} \right\}$$

$$ET_{forest} = \left\{ \frac{1 + 2.0 \times 1410 / P}{1 + 2.0 \times 1410 / P + P / 1410} \right\} \times P$$

$$ET_{non-forest} = \left\{ \frac{1 + 0.5 \times 1100 / P}{1 + 0.5 \times 1100 / P + P / 1100} \right\} \times P$$

Zhang et al. (1999, 2001)
Bradford et al. (2001)

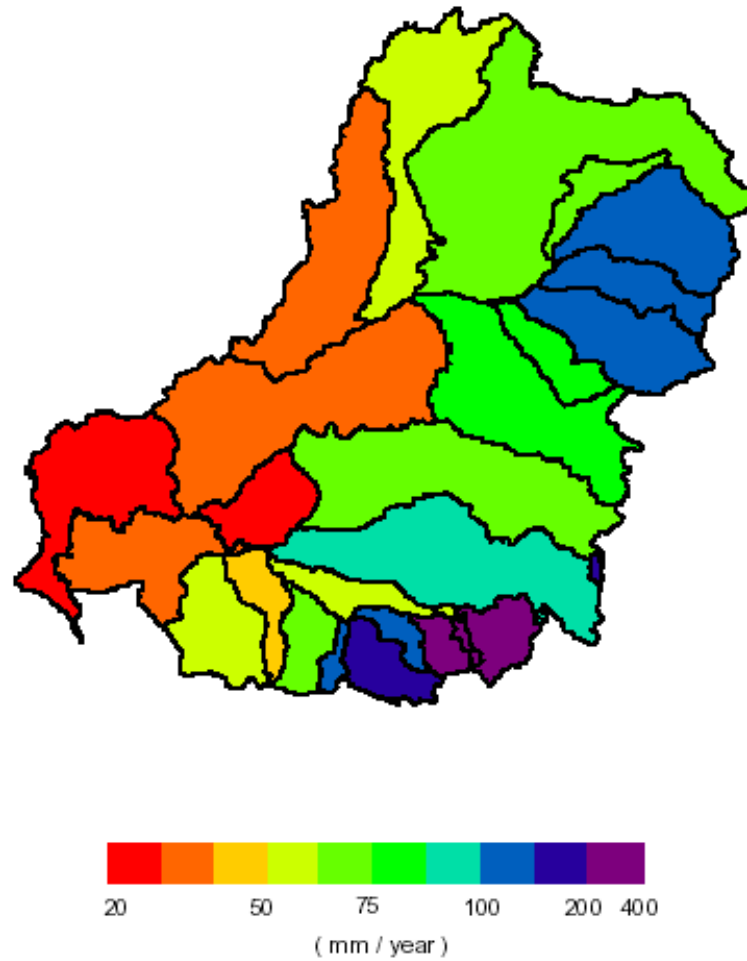


Figure 17 Predicted mean annual water yield distribution across the Murray-Darling Basin under current vegetation cover

Zhang et al. (1999, 2001)
Bradford et al. (2001)

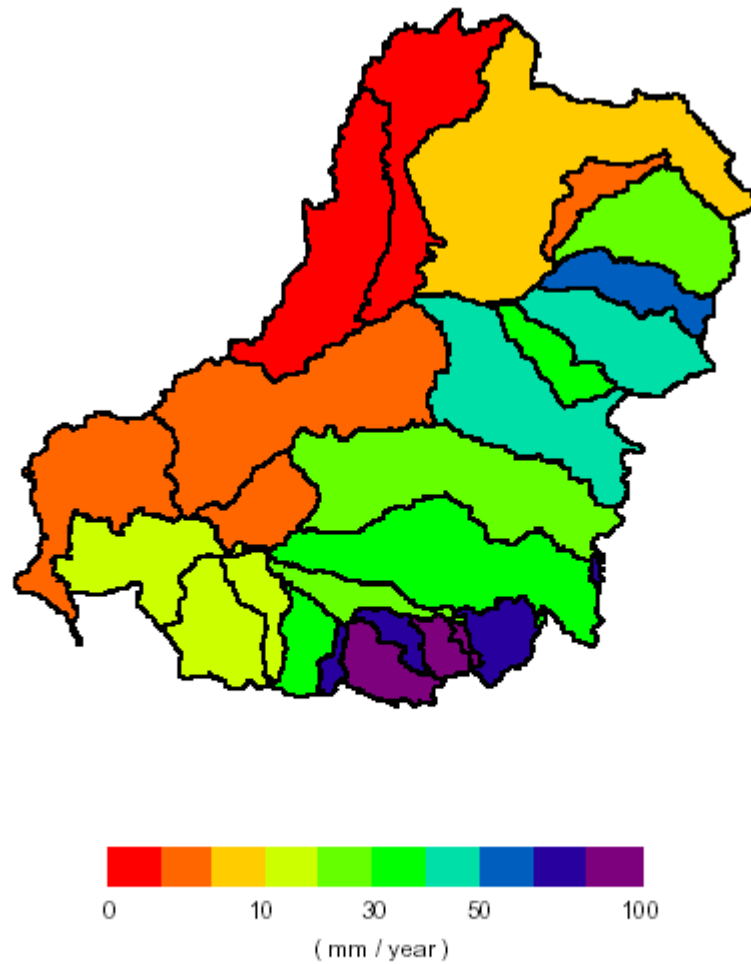


Figure 19 Increase in water yield from pre-European vegetation cover to current vegetation cover

Zhang et al. (1999, 2001)
Bradford et al. (2001)

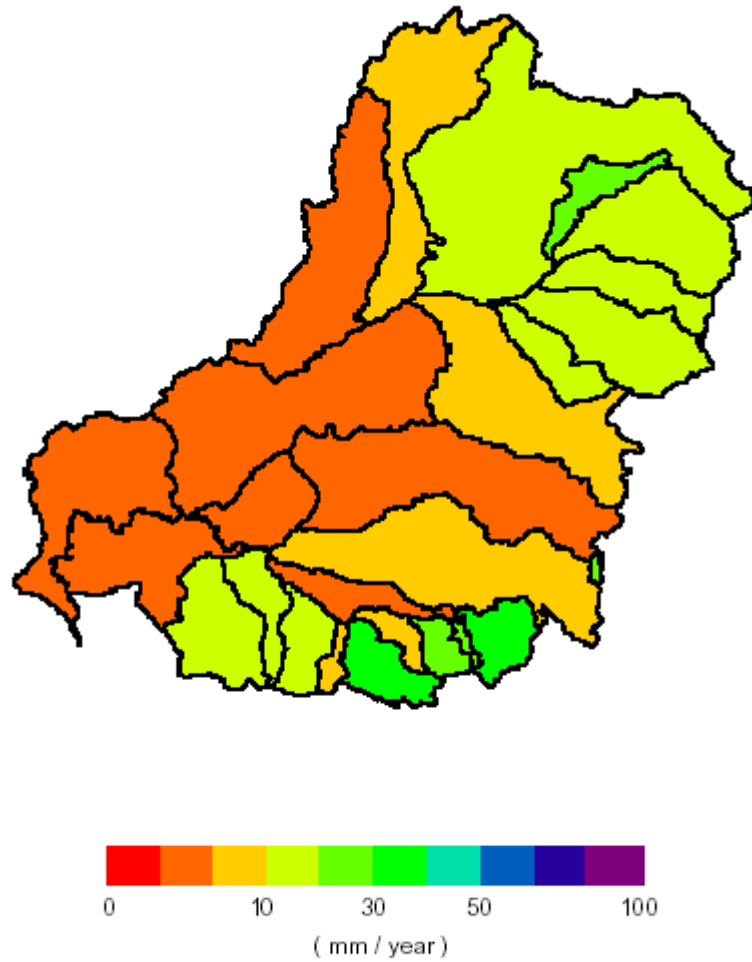
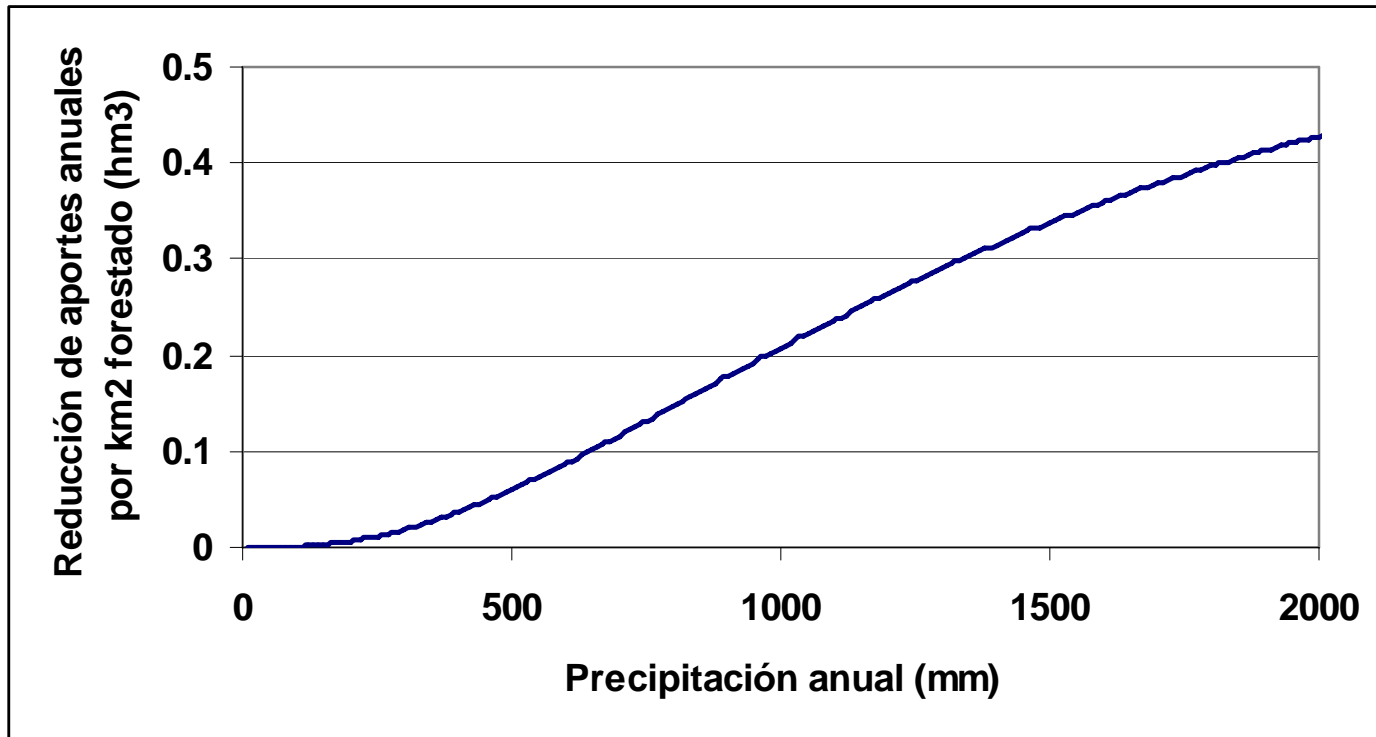


Figure 21 Change in water yield from current vegetation to potential afforested areas



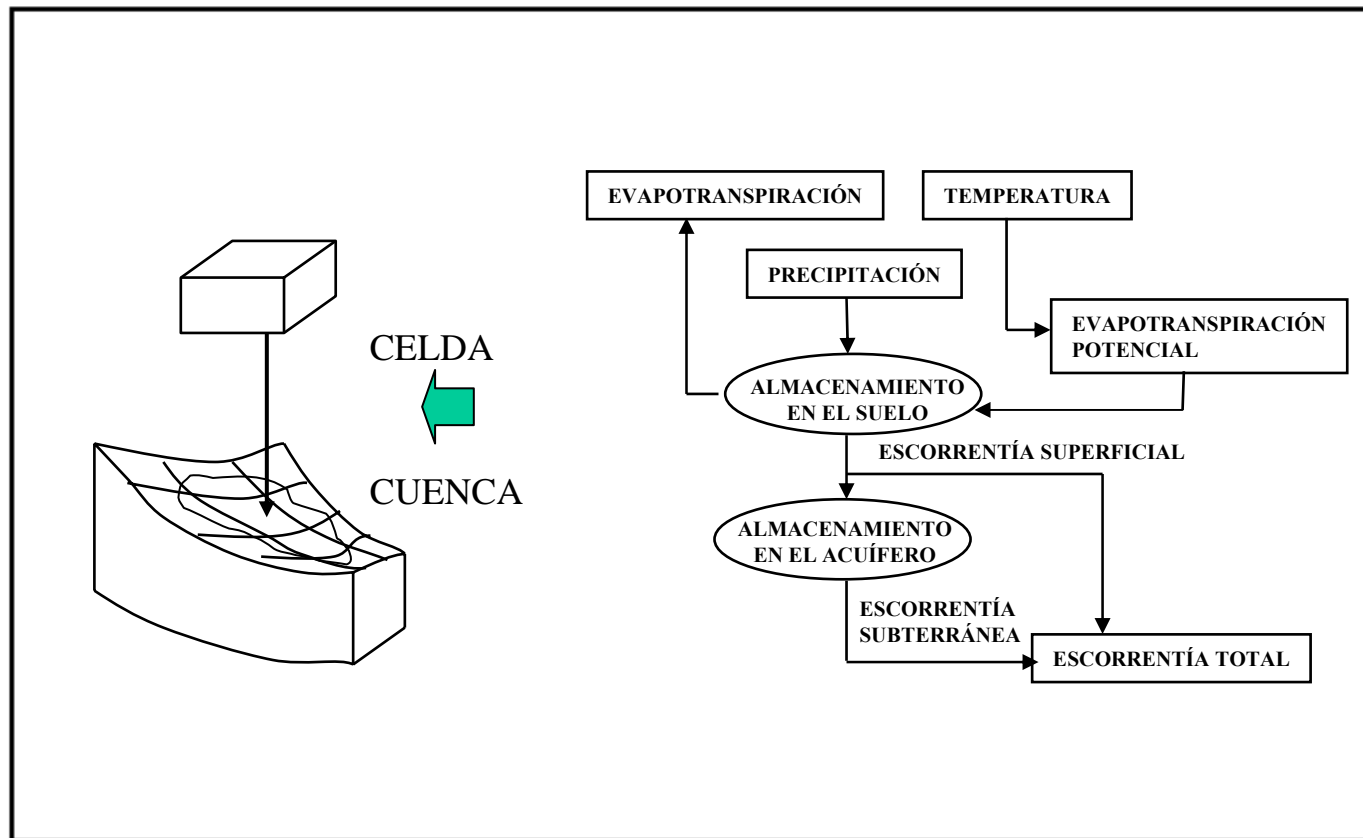


Figura 96.
Representación
esquemática del
modelo distribuido
empleado

Modelo de balance mensual paramétrico,
Para cada celda y paso de tiempo (mes):

$$d = \mathbf{H}^{\max} - H_{t-1} + \mathbf{EP}$$

déficit

$$P^0 = \mathbf{C} \cdot (\mathbf{H}^{\max} - H_{t-1})$$

Lluvia inicial

$$T = (P - P^0)^2 / (P + d - 2 P^0)$$

Lluvia eficaz

$$H = \max (0 , H_{t-1} + P - T - \mathbf{EP})$$

Humedad actualizada

$$I = \mathbf{I}^{\max} \cdot T / (T + \mathbf{I}^{\max})$$

Infiltración efectiva

$$Q_t = \alpha \cdot \Sigma V_t$$

Vaciado del acuífero

$$V_t = V_{t-1} \cdot e^{-\alpha t} + \Sigma I_t \cdot (1 - e^{-\alpha t})$$

Actualización acuífero

SIMPA: MIMAM (1998)

Uso del suelo	Capacidad máxima de humedad del suelo (mm)
Superficies artificiales	40
Espacios con poca vegetación	100
Tierras de labor en secano	155
Tierras de labor en regadío	215
Praderas y pastizales naturales	150
Sistemas agrícolas heterogéneos	195
Cultivos permanentes	210
Vegetación arbustiva	135
Bosque mixto	220
Bosques de frondosas y coníferas	230
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	300

Tabla 13. Regionalización de la capacidad máxima de humedad del suelo a partir de los usos del suelo

SIMPA: MIMAM (1998)

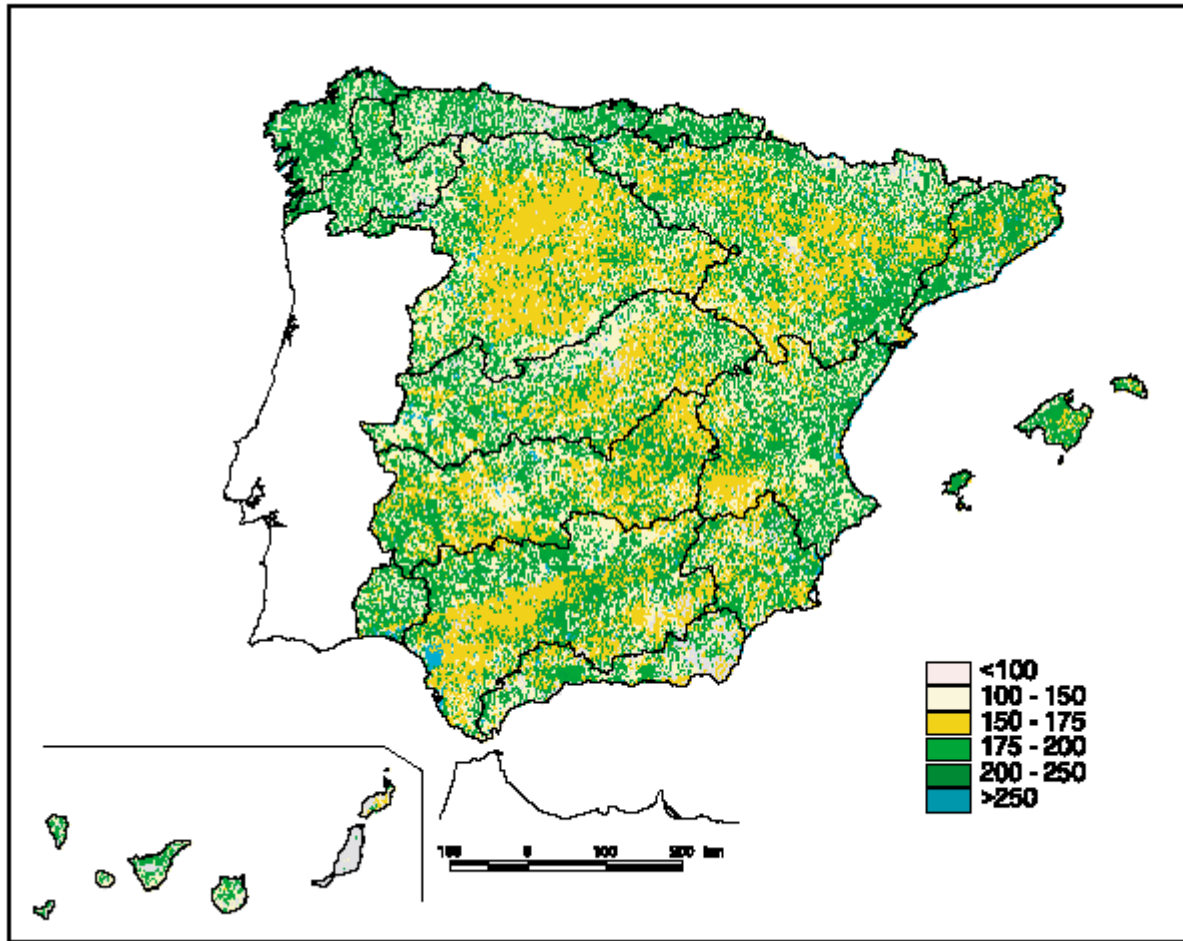


Figura 98. Mapa de capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (mm)

SIMPA: MIMAM (1998)

Litología	Infiltración máxima (mm)
Material aluvial de origen indiferenciado	400
Calizas y dolomías	1.000
Margas	85
Margas yesíferas	75
Yesos	64
Materiales arenosos	450
Materiales gravo-arenosos	500
Calcarenitas (Macigno)	250
Arcosas	150
Rañas	95
Granitos	65
Rocas metamórficas	20
Gneiss	55
Pizarras	40
Rocas volcánicas	275

*Tabla 14.
Regionalización de la
capacidad máxima de
infiltración a partir de
la litología*

SIMPA: MIMAM (1998)

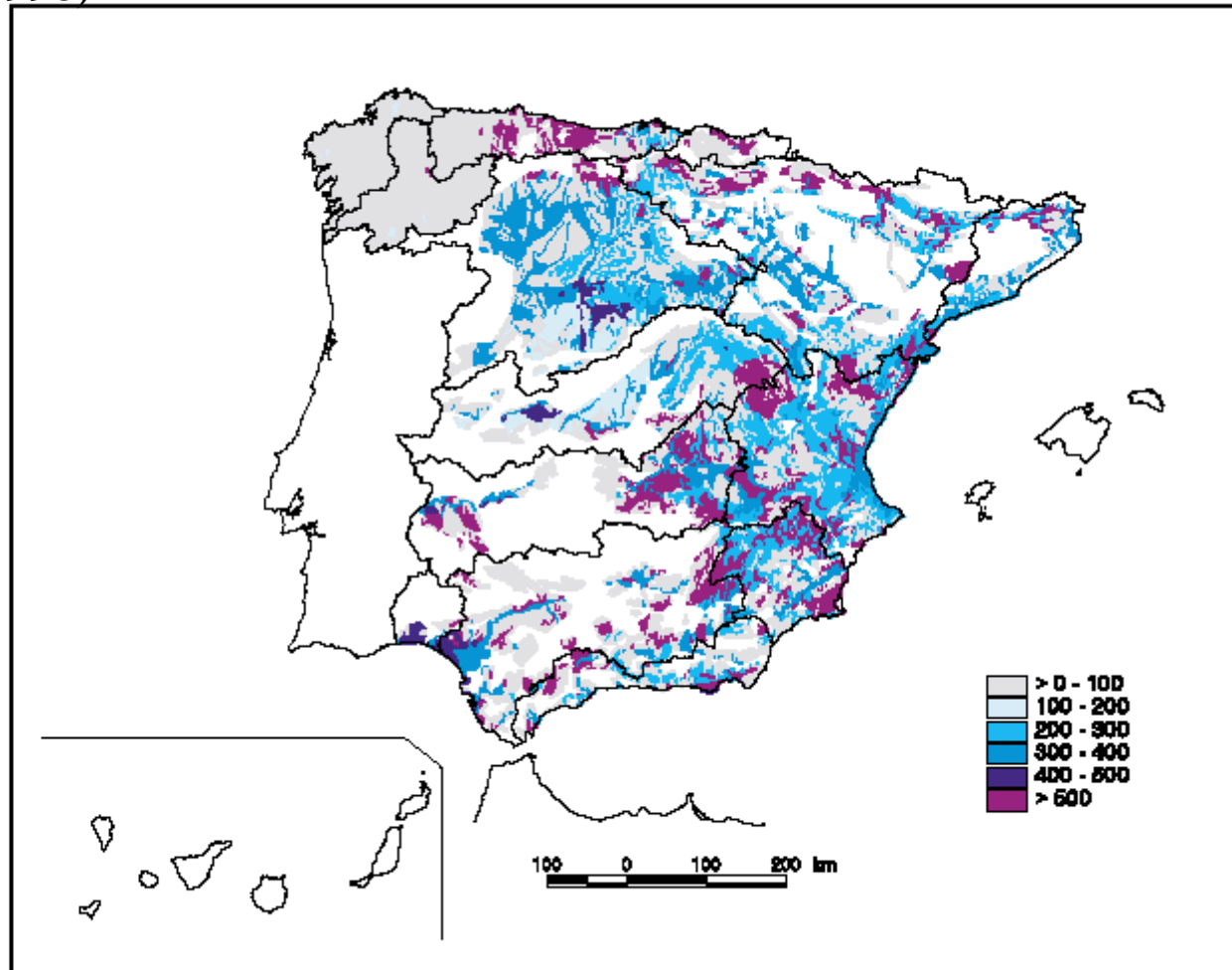


Figura 99. Mapa de capacidad máxima de infiltración (mm/mes)

SIMPA: MIMAM (1998)

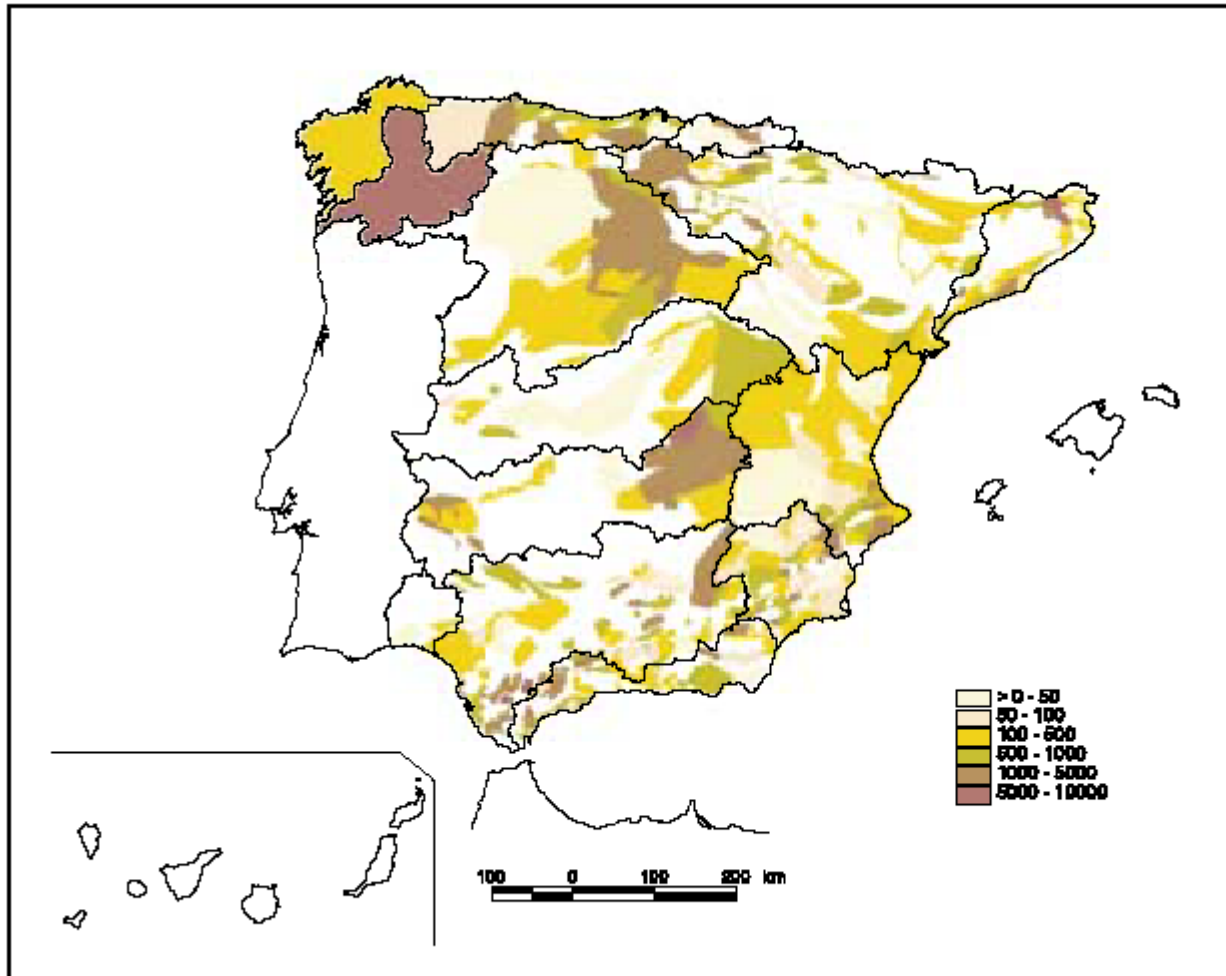


Figura 100. Mapa de coeficientes de recesión (dias⁻¹x100.000)

SIMPA: MIMAM (1998)

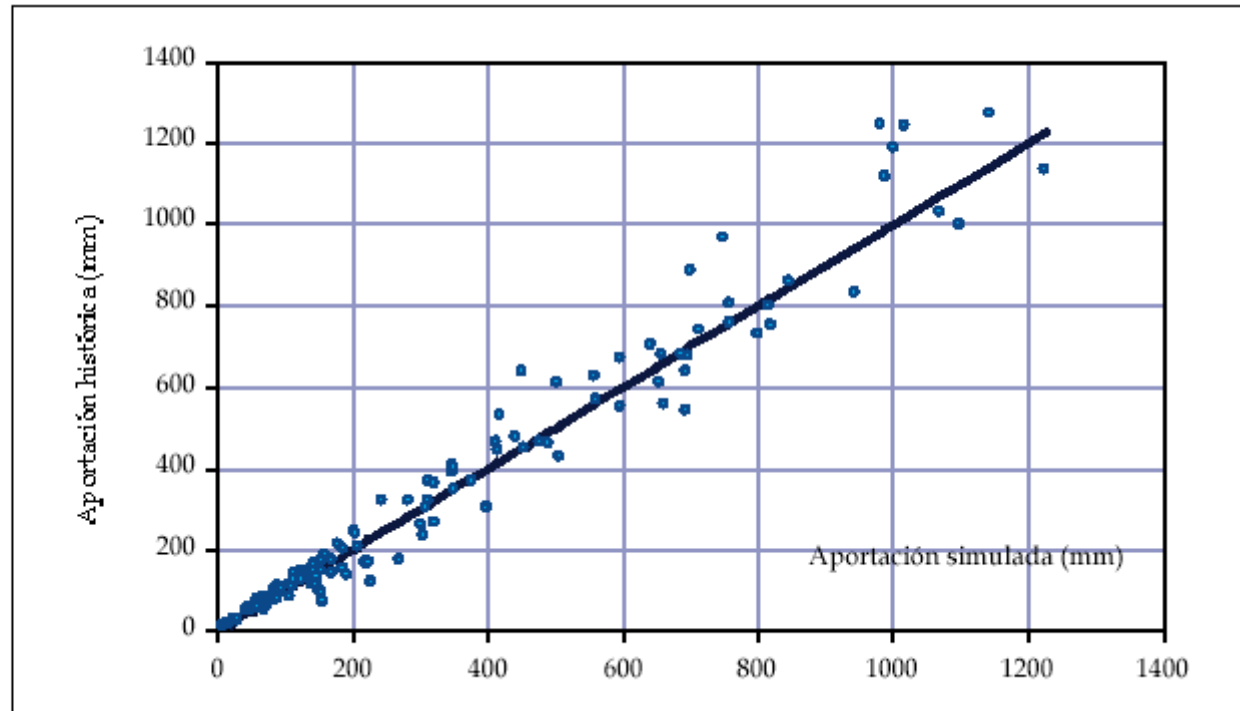


Figura 103. Contraste del modelo en valores medios anuales

SIMPA: MIMAM (1998)

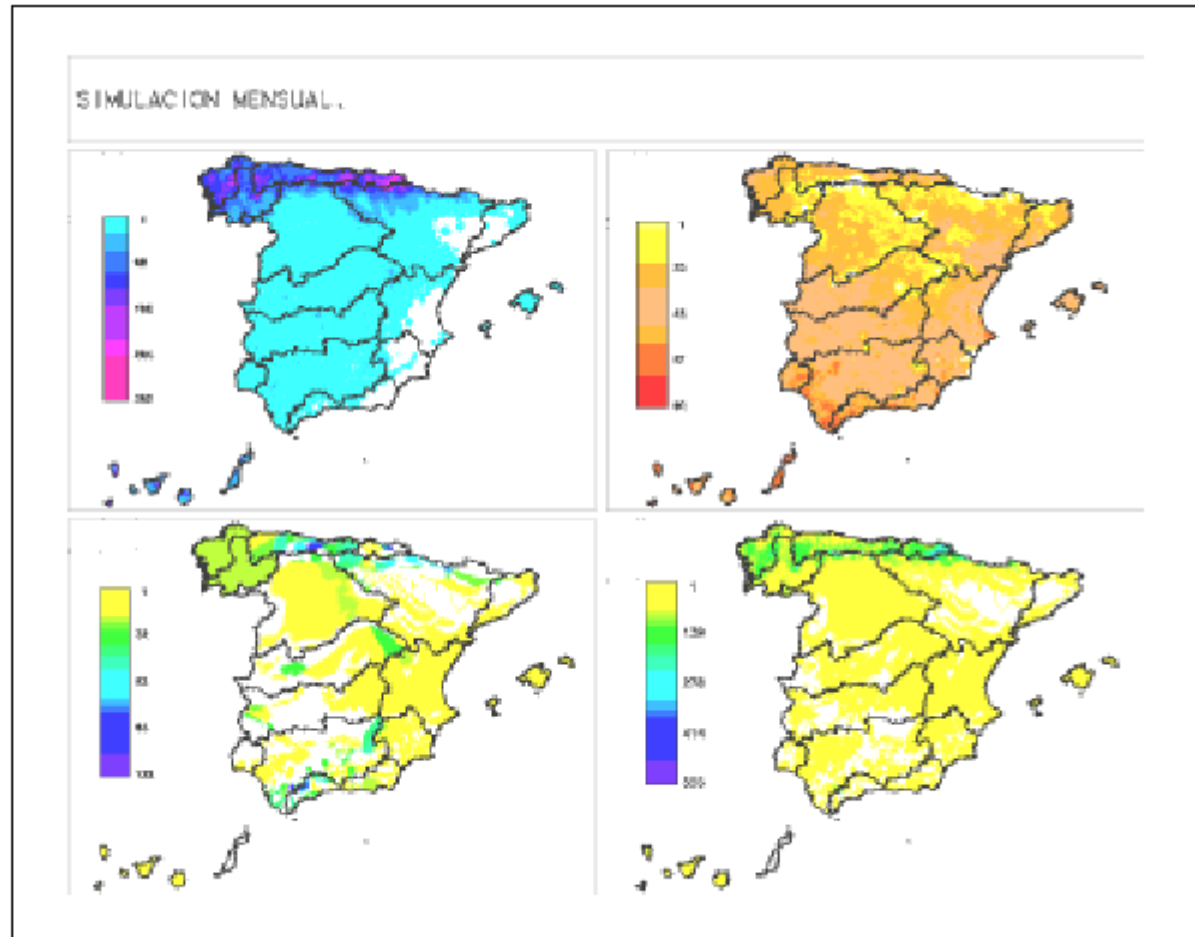
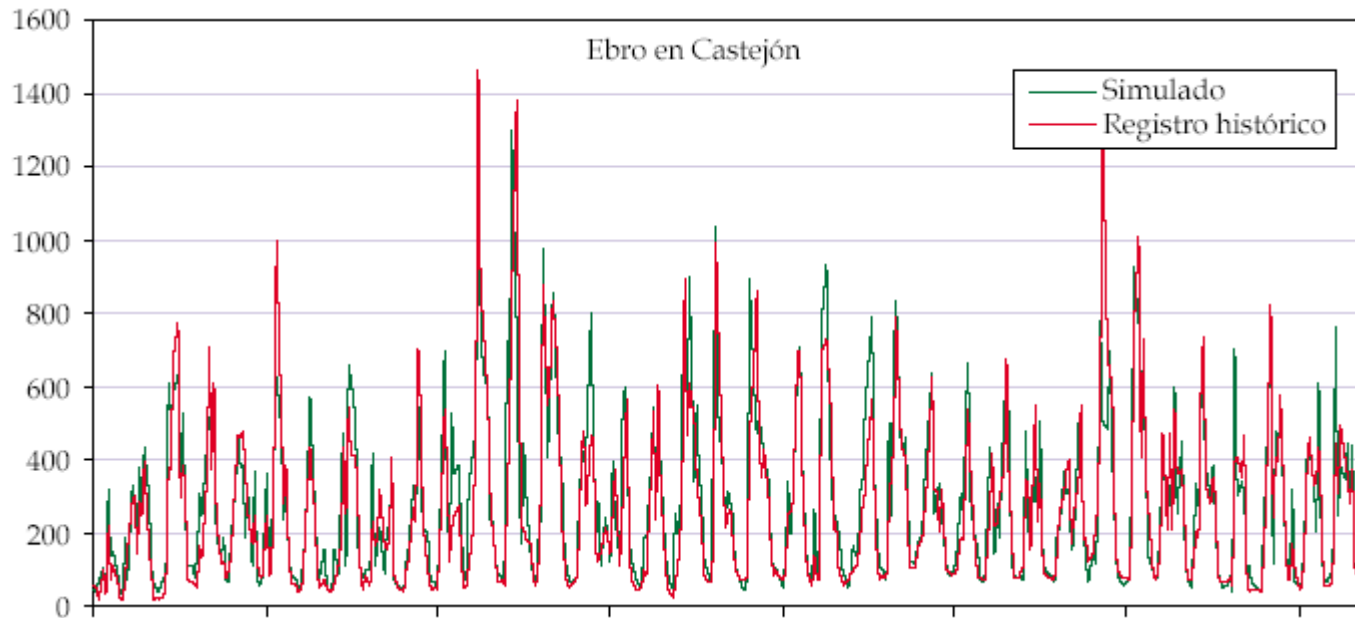
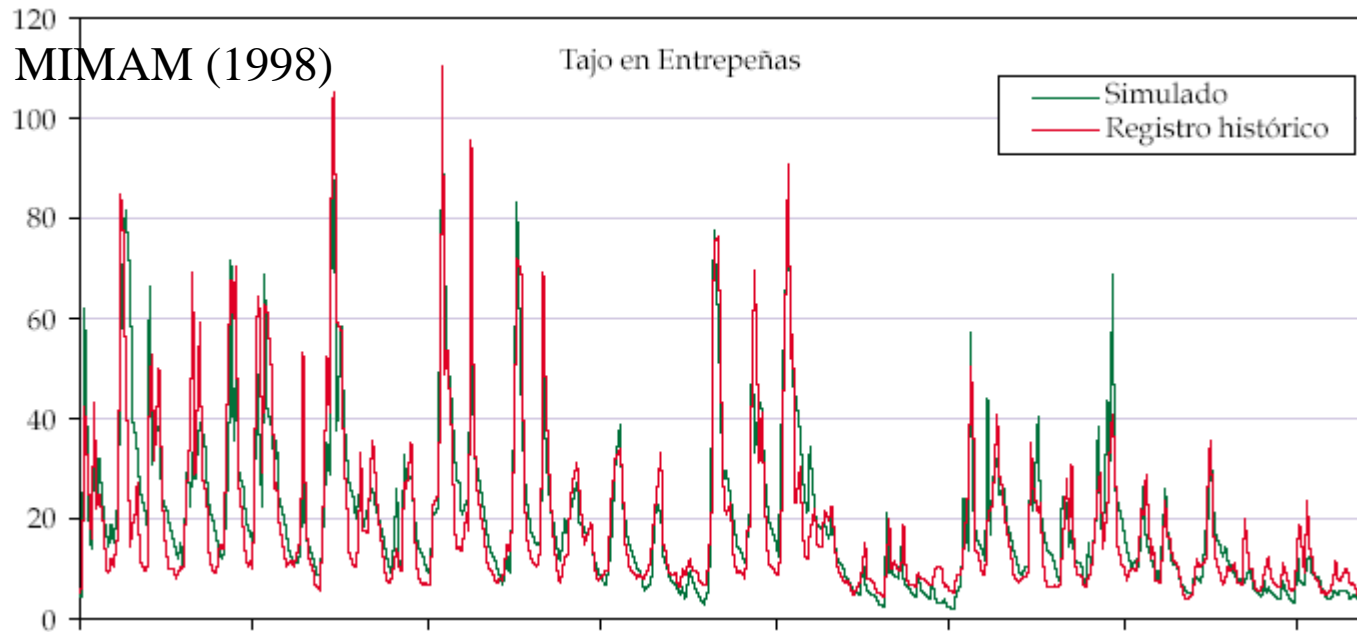


Figura 102. Ejemplo de mapas generados en la simulación de escorrentías en un intervalo de tiempo (febrero de 1970)

SIMPA: Ruiz-García (1999), MIMAM (1998), Témez (1977)

SIMPA: MIMAM (1998)



SIMPA: MIMAM (1998)

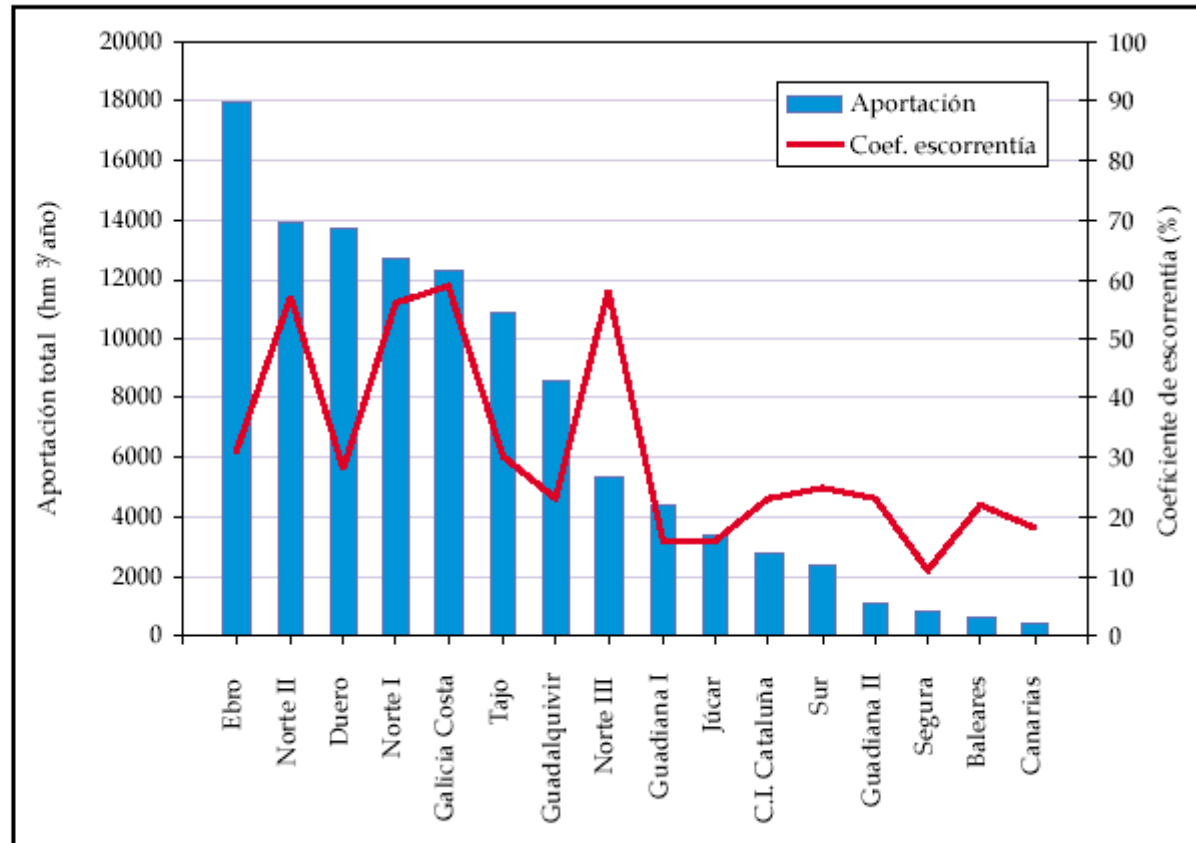


Figura 106.
Aportaciones totales medias anuales (hm³/año) y coeficientes de escorrentía en régimen natural en los diferentes ámbitos territoriales de los Planes Hidrológicos

SIMPA: MIMAM (1998)

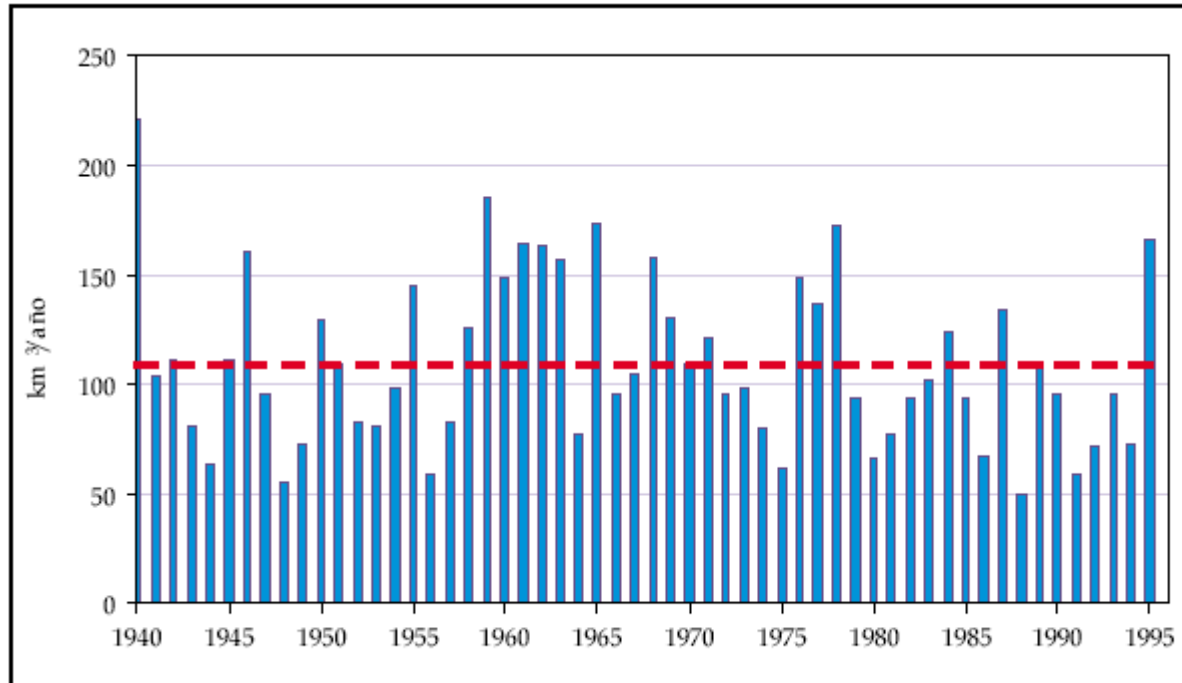
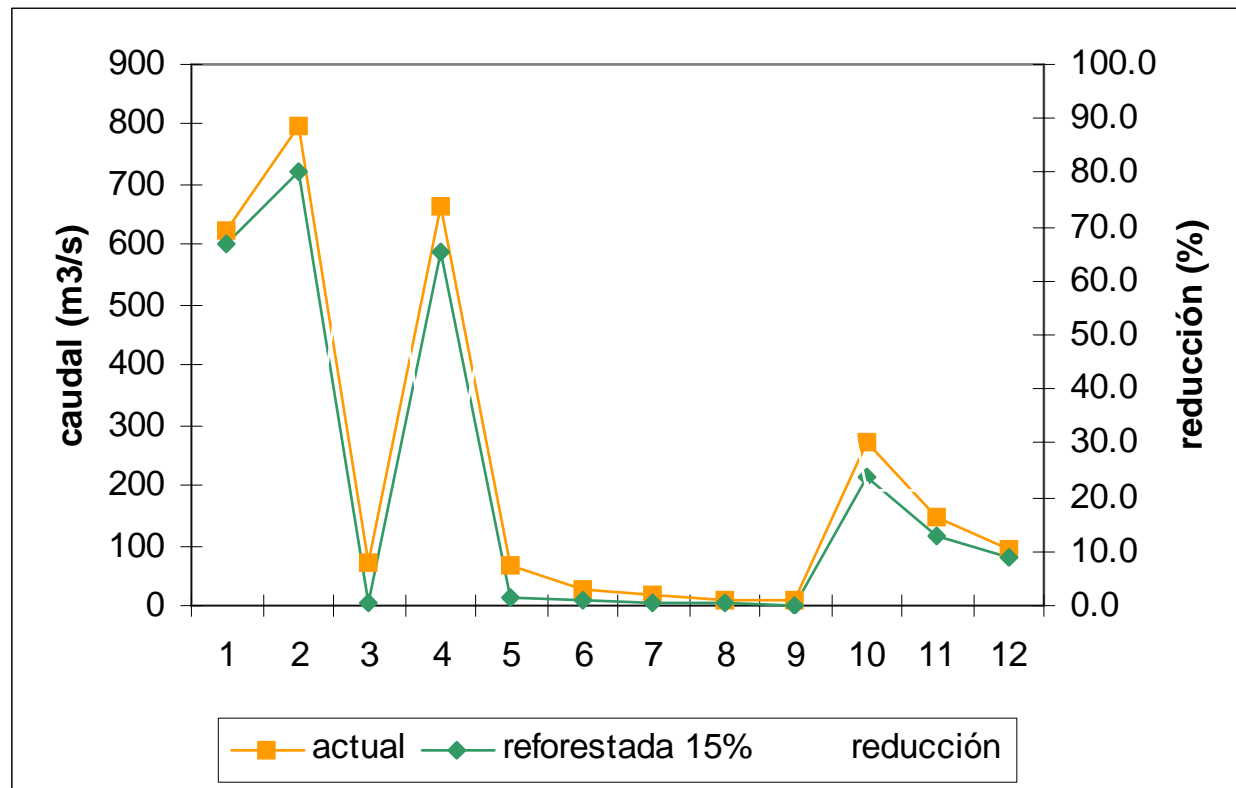


Figura 109. Serie de aportaciones totales anuales en régimen natural en la España peninsular (periodo 1940/41-1995/96)

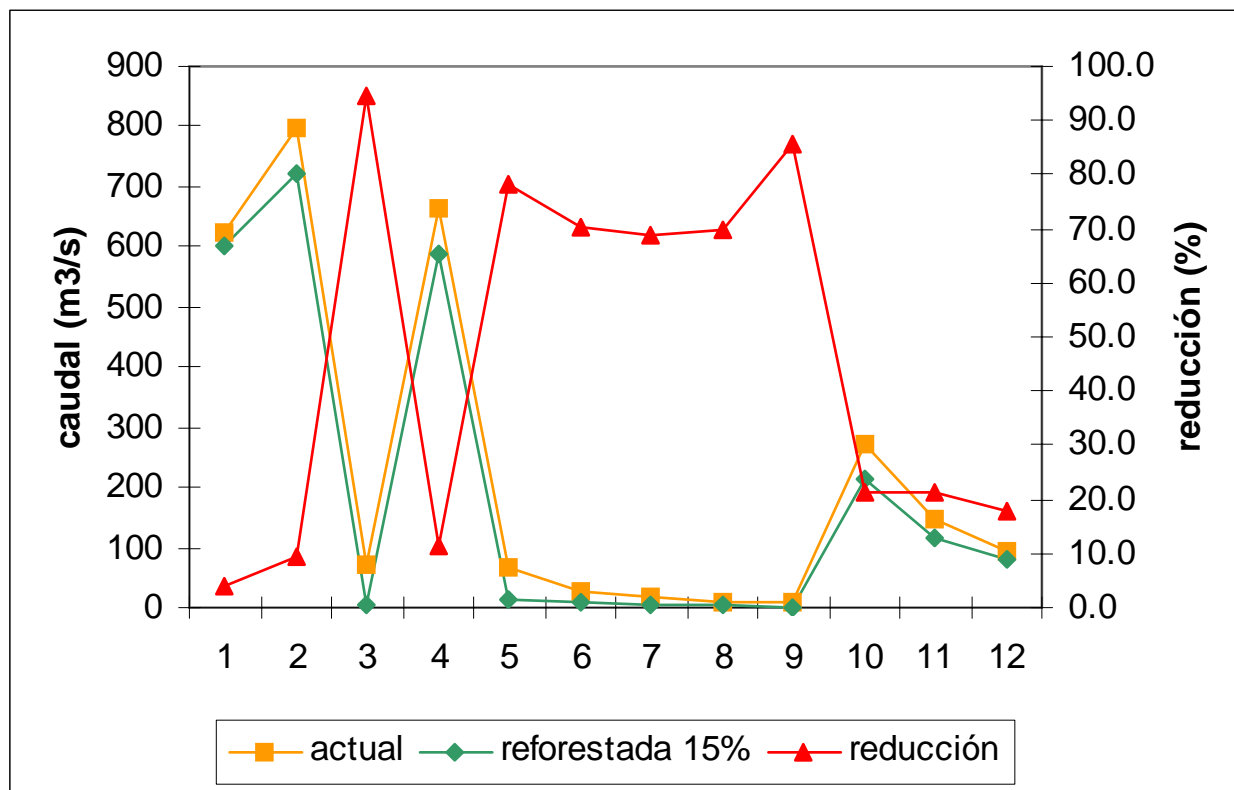
SIMPA: Ruiz-García (1999)

Experimento reforestación en una subcuenca del Guadiana: 15% de la cuenca

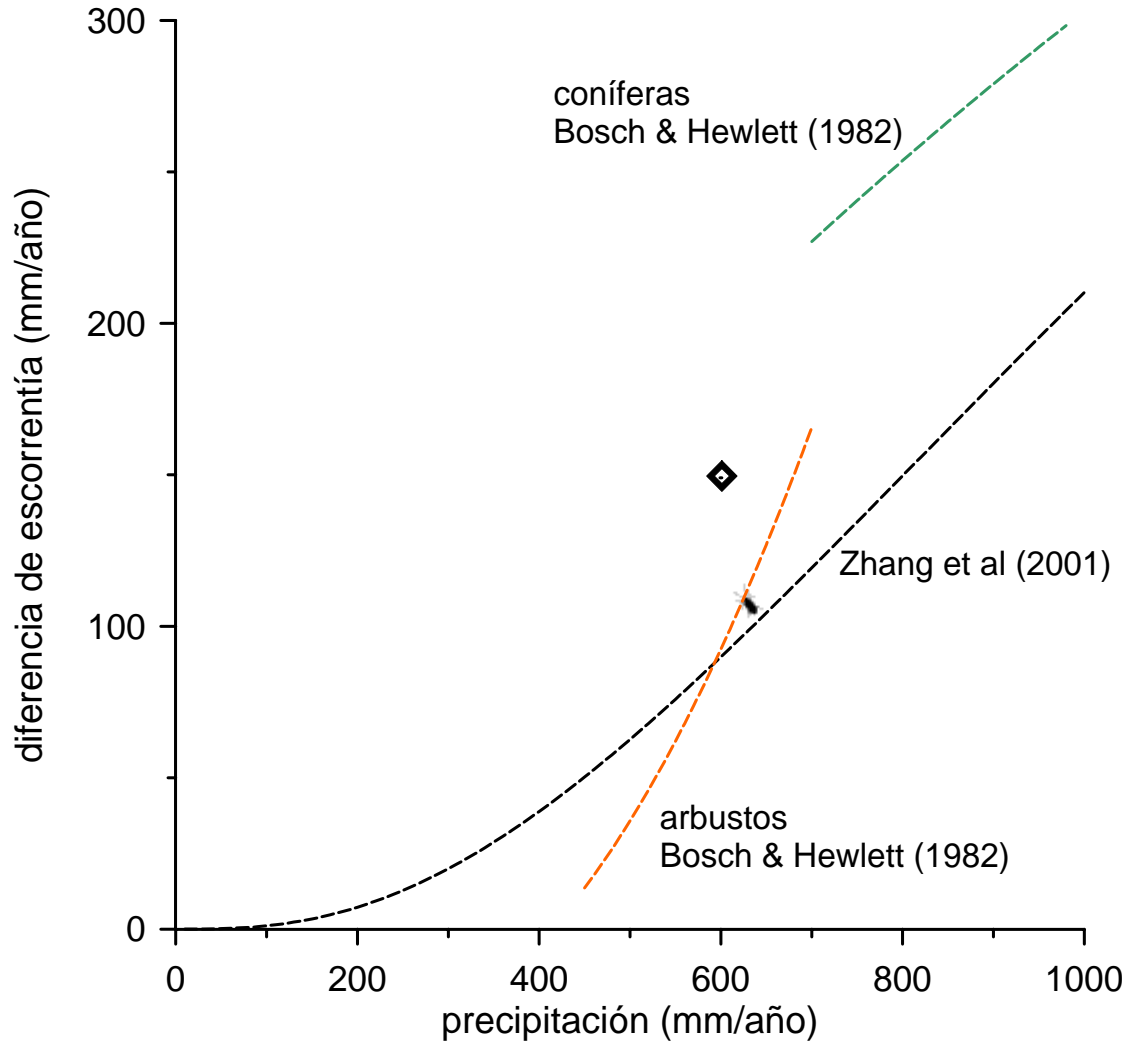


SIMPA: Ruiz-García (1999)

Experimento reforestación en una subcuenca del Guadiana:
15% de la cuenca, reducción de un 16% de los caudales, sobre
todo en verano.



SIMPA: Ruiz-García (1999)



SIMPA: Ruiz-García (1999)

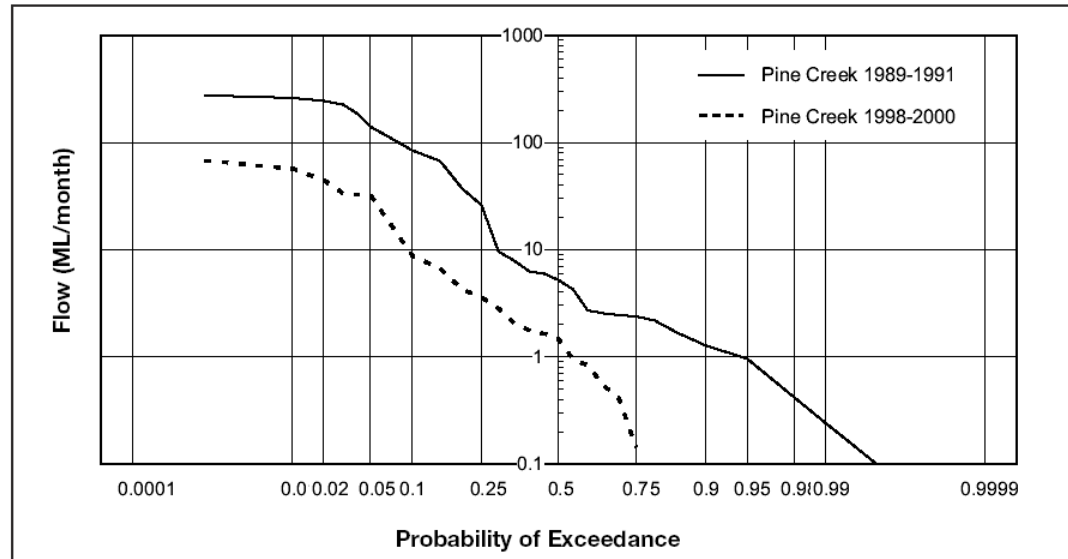
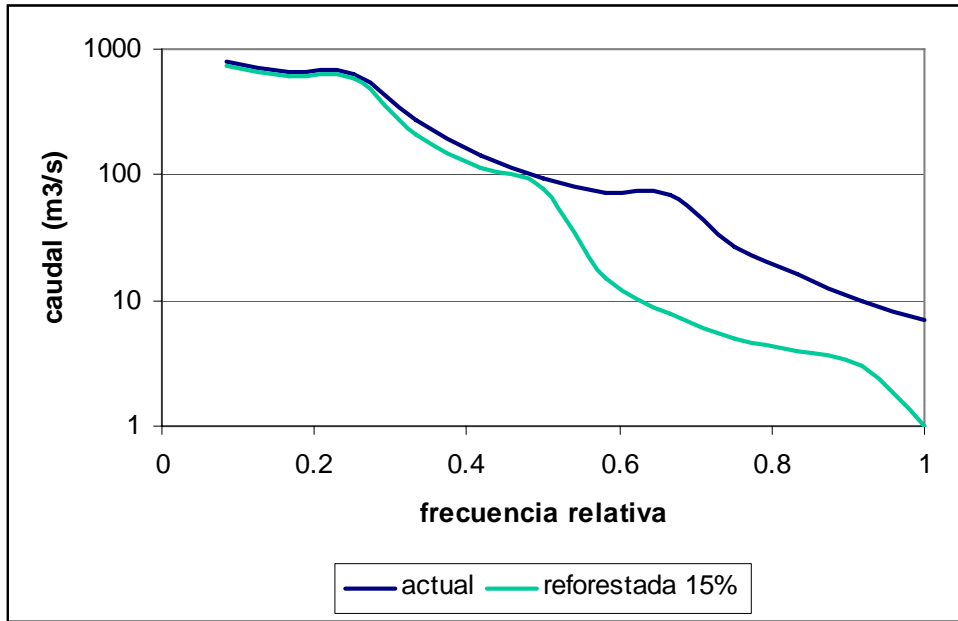


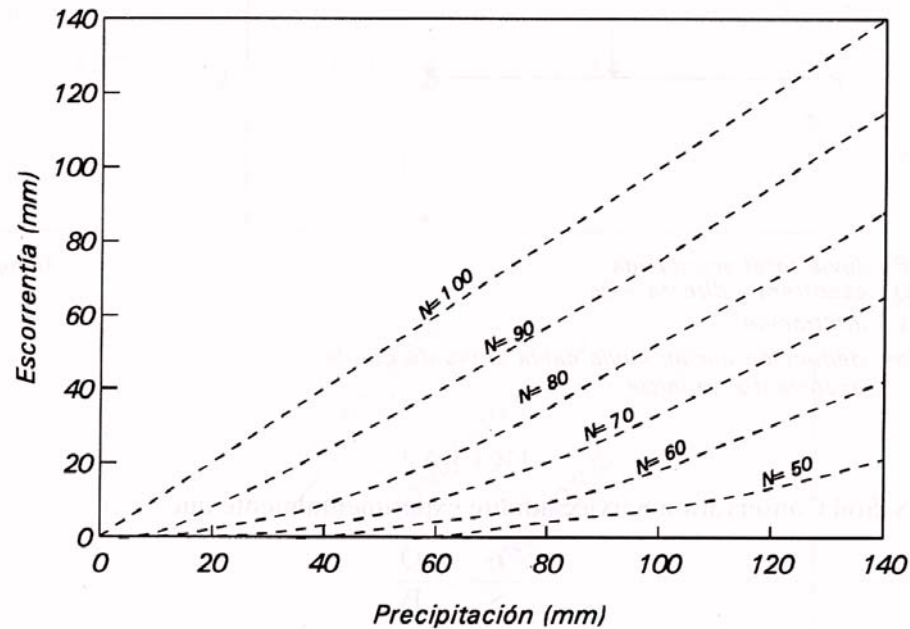
Figure 16b. Monthly flow duration curves under grass (solid line) and pine (dotted line) for Pine Creek catchment.

Número de Curva (US SCS, 1972)

NC; López- Cadenas et al (1994)

$$Q = (P - 0.2 S)^2 / (P + 0.8 S)$$

$$S = 254 ((100/N)-1) \text{ mm}$$



Número de Curva (US SCS, 1972)

NC; López- Cadenas et al (1994)

Cuadro 3.4
Número de curva de escorrentía para áreas forestales⁽¹⁾

Descripción de la cubierta		Nº de curva para cada grupo hidr. de suelo			
Tipo de cubierta	Estado hidrológico	A	B	C	D
Pastos, prados, o forraje permanente para pastoreo ⁽²⁾	Malo	68	79	86	89
	Medio	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
Prados cubiertos permanentemente con hierba, protegidos del pastoreo y normalmente segados para heno (prados de siega).	—	30	58	71	78
Matorral, mezcla de matorral y maleza siendo el matorral el elemento prioritario ⁽³⁾	Malo	48	67	77	83
	Medio	35	56	70	77
	Bueno	30 ⁽⁴⁾	48	65	73
Mezcla de bosques y hierva (huerto o árboles frutales) ⁽⁵⁾	Malo	57	73	82	86
	Medio	43	65	76	82
	Bueno	32	58	72	79
Bosques ⁽⁶⁾	Malo	45	66	77	83
	Medio	36	60	73	79
	Bueno	30 ⁽⁴⁾	55	70	77
Granjas, construcciones, caminos carreteras y alrededores	—	59	74	82	86

Número de Curva (US SCS, 1972)

NC; López- Cadenas et al (1994)

Cuadro 3.5
Número de curva de escorrentía para zonas de montaña áridas y semiáridas⁽¹⁾

Descripción de la cubierta		Nº de curva para cada grupo hidr. de suelo			
Tipo de cubierta	Estado hidrológico ⁽²⁾	A ⁽³⁾	B	C	D
Herbácea: Mezcla de hierba, maleza matorral de bajo crecimiento, siendo el matorral el elemento de menor importancia	Malo		80	87	93
	Medio		71	81	89
	Bueno		62	74	85
Roble/álamo: Mezcla de garriga, álamo caoba de montaña, “bitter brush”, arce y otros arbustos	Malo		66	74	79
	Medio		48	57	63
	Bueno		30	41	48
Pinaceas/Juniperus: Pinaceas, Juniperus o ambos con hierba bajo cubierta	Malo		75	85	89
	Medio		58	73	80
	Bueno		41	61	71
Labiadas con hierba bajo cubierta	Malo		67	80	85
	Medio		51	63	70
	Bueno		35	47	55
Mata desértica: La mayoría de las plantas incluyen plantas halófilas, plantas crasas, plantas con aceites esenciales	Malo	63	77	85	88
	Medio	55	72	81	86
	Bueno	49	68	79	84

Notas:

Número de Curva (US SCS, 1972)

NC; López- Cadenas et al (1994)

— Debe tenerse en cuenta en el estudio de las escorrentías el estado de humedad del suelo previo a la lluvia: considerando la cantidad de lluvia caída en el período de los cinco días anteriores, estableciéndose tres clases de situaciones con dicha cantidad (Cuadro 3.6.) Las condiciones medias quedan incluidas en la condición II, que es en la que está elaborada el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.6
Condiciones precedentes de humedad

Condición	Lluvia total caída durante los cinco días anteriores	
	Período húmedo: Oct-Mar.	Período seco: Abr-Sep.
I	Menos de 12,5 mm	Menos de 35,5 mm
II	De 12,5 a 28 mm.	De 35,5 a 53 mm.
II	Más de 28 mm.	Más de 53 mm.

Estas condiciones precedentes de humedad del suelo, que tienen gran importancia, se valoran modificando el Número de Curva según el Cuadro 3.7

Número de Curva (US SCS, 1972)

	10	4	26
NC; López- Cadenas et al (1994)	5	2	17
	0	0	0

Como ya se ha dicho previamente, el Numero de Curva obtenido de Cuadro 3.1 corresponde a unas condiciones de humedad medias (condición II). Si en el momento de producirse la precipitación el suelo se encuentra saturado debido a lluvias precedentes, la escorrentía que debe esperarse será mayor (condición III); por el contrario, si el suelo está especialmente seco, la escorrentía será menor (condición I).

Se adjunta el gráfico correspondiente al Cuadro 3.1 (Figura 3.5).

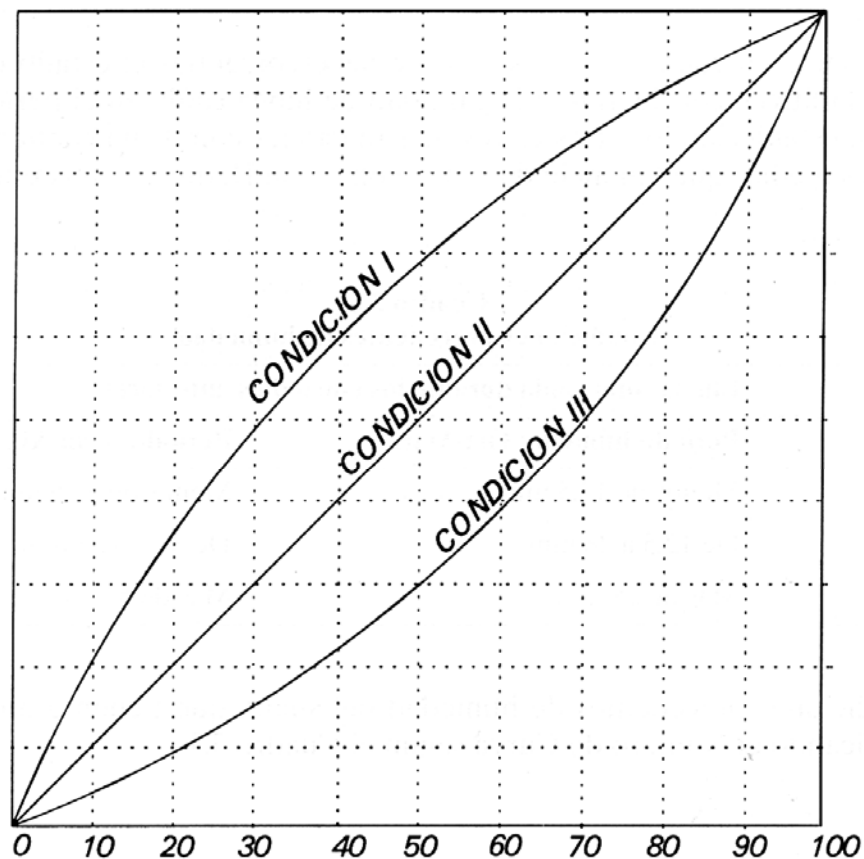


FIGURA 3.5

Límites a la evapotranspiración

Cubierta	Tiempo seco	Tiempo húmedo
Límites principales en clima templado		
Vegetación alta	Fisiológicos – humedad del suelo	advección
Vegetación baja	Humedad del suelo - radiación	Radiación - fisiológicos
Límites principales en clima tropical		
Vegetación alta	Humedad del suelo – tamaño árbol	Tamaño gotas - fisiológico
Vegetación baja	Humedad del suelo	radiación

Escala diaria

HYLUC Calder (2003)

Tiempo húmedo: interceptación

$$I = \gamma (1 - \exp(-\delta P))$$

γ

Vegetación dispersa = 0

Vegetación corta o arbustiva = 2.5

Caducifolias con hojas = 4.5

Caducifolias sin hojas = 3.7

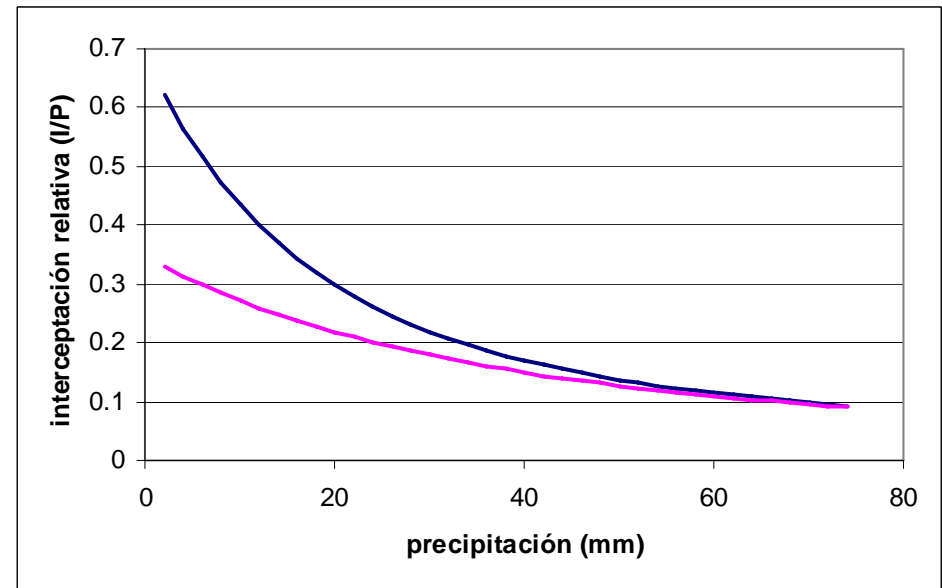
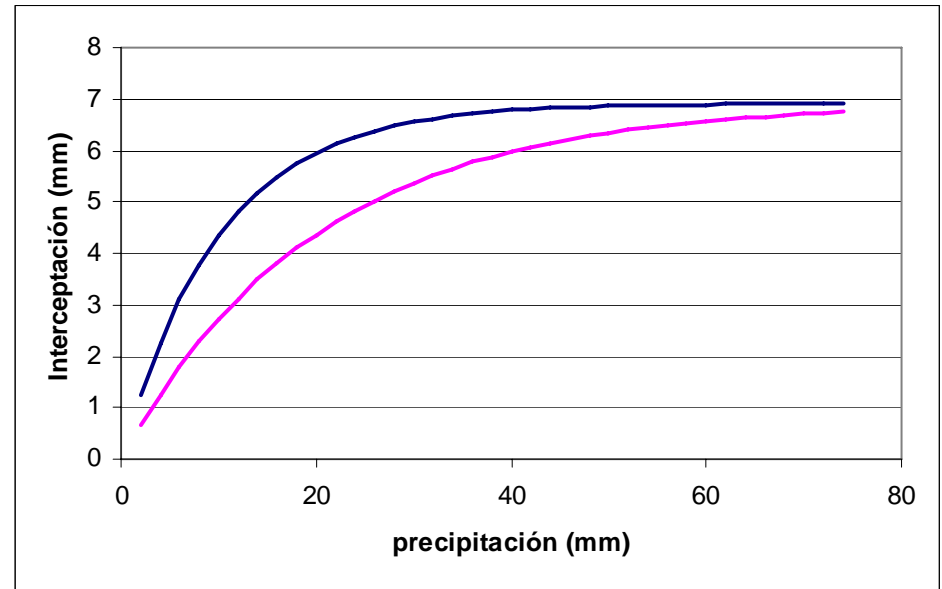
Bosque de coníferas = 7

Gráfico:

$\gamma = 6.91$

$\delta = 0.099$ (cerrado)

$\delta = 0.05$ (abierto)



Tiempo seco: transpiración

$$E_d = \beta m E_T$$

β : Factor de transpiración

(coeficiente de cultivo)

Suelos desnudos = 0.5

Bosque = 0.9

Vegetación corta = 1

Áreas cultivadas = 1

a_w : Agua Disponible

No-bosque = 75 - 179mm

Bosque = 162 - 288mm

$$m = 1; \quad \delta_s < a_w/2$$

$$m = 2(1 - \delta_s a_w); \quad \delta_s < a_w/2$$

$$\delta_{s,i} = \delta_{s,i-1} + E_{d,i-1} - P_{i-1} + D_{i-1}$$

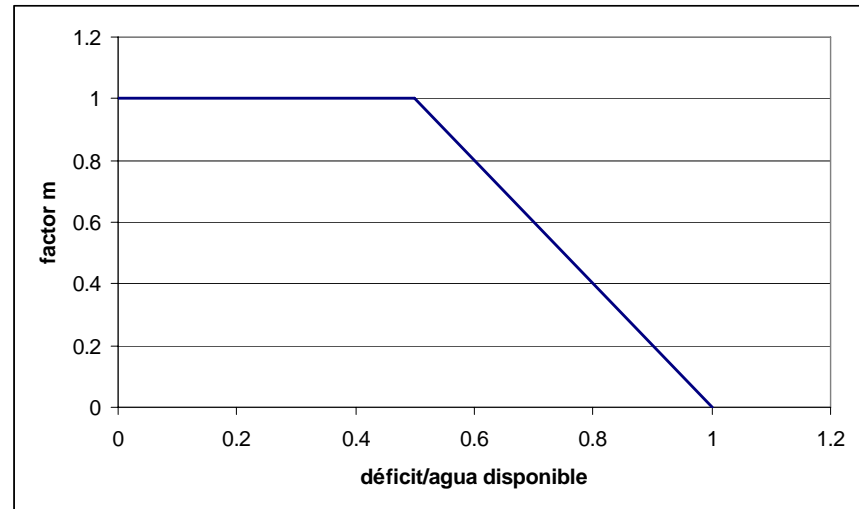


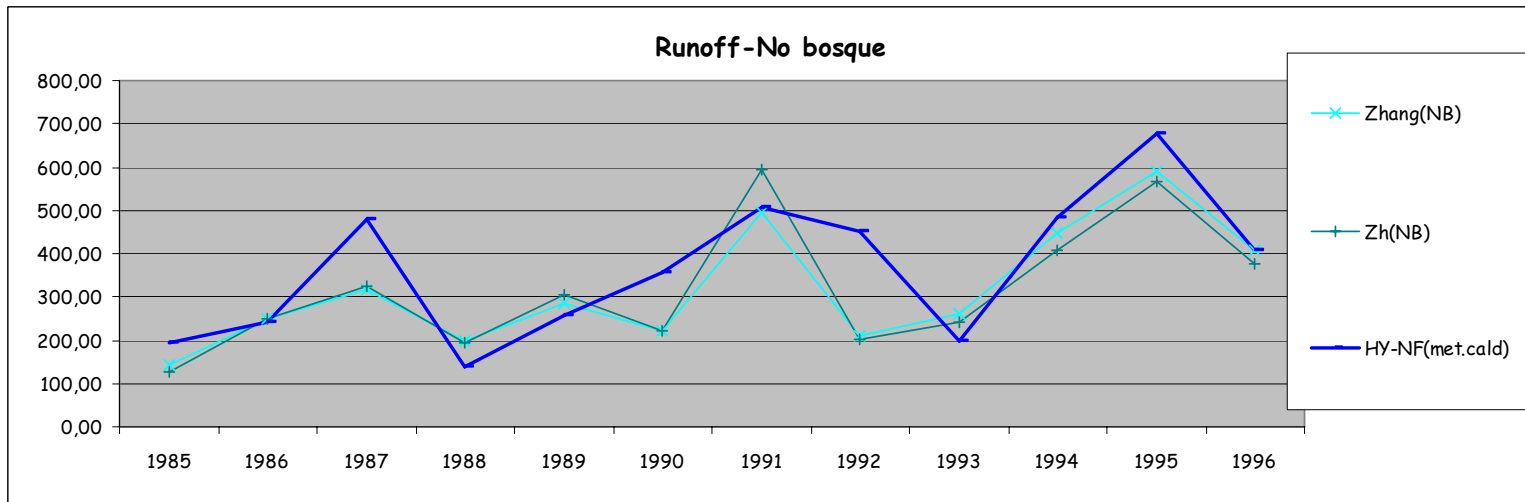
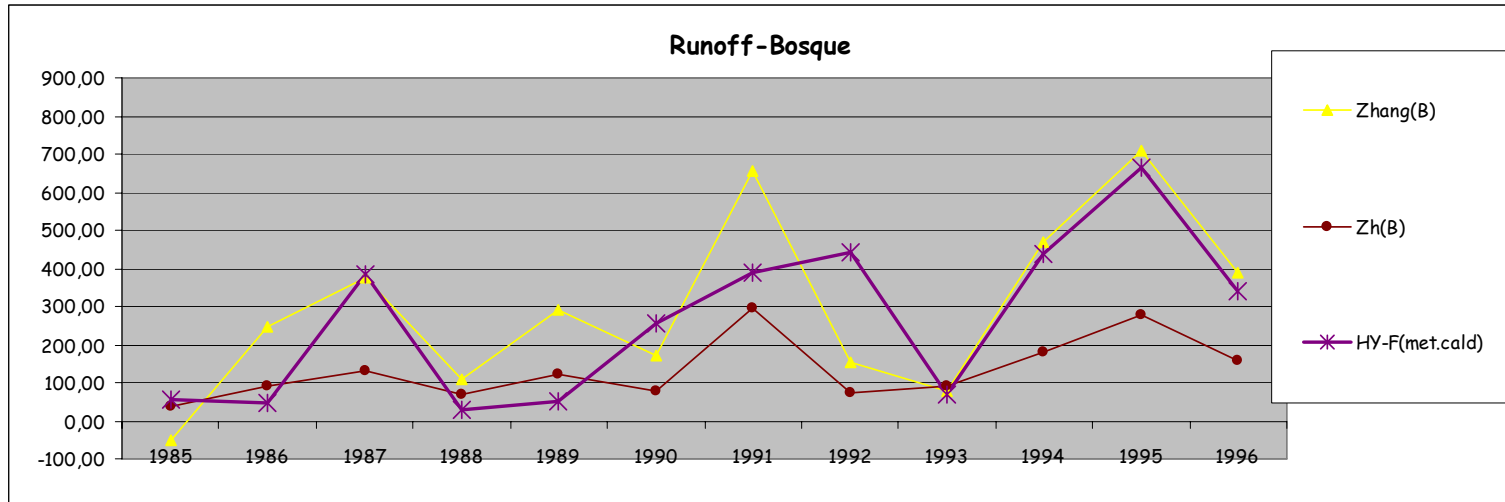
Table 2. Parameter values used in HYLUC scenarios

Name and symbol	Units	Land use	Value	Justification
available water (aw)	mm	dryland crops	100	based on a rooting depth of 500 mm and available water holding capacity of 20%
		irrigated crops	100,000	notional value to ensure no water stress
		forestry	200	assumes double the rooting depth of dryland crops
		gullies	50	assumes half the rooting depth of dryland crops
evaporation factor (beta)	-	dryland crops (no water harvesting features)	1.0 (wet season) 0.7 (dry season)	assumes evaporation proceeds at potential rate if no water stress in wet season, and reduced rate in dry season
		dryland crops (moderate water harvesting features)	1.02 (wet season) 0.77 (dry season)	evaporation enhanced to account for 5% coverage of land with water harvesting features with wet season evaporation factor of 1.33 and dry season evaporation factor of 2.0.
		dryland crops (many water harvesting features)	1.03 (wet season) 0.83 (dry season)	as above, for 10% coverage of land with water harvesting features
		irrigated crops	1.00 (both seasons)	assumes evaporation proceeds at potential rate if no water stress
		forestry	0.9 (both seasons)	standard value for forestry
		gullies	0.7 (both seasons)	assumed that scant vegetation will lead to low evaporation
interception loss (gamma)	mm/d	all cropping and gullies	0	all rainfall was assumed to reach the soil
		forestry	4.5	standard value for forestry
maximum soil infiltration rate (filtmax)	mm/d	cropping with no water harvesting features, forestry and gullies	861	value used in previous studies
		cropping with moderate water harvesting features	1722	assumed that water harvesting features will enhance infiltration

Name and symbol	Units	Land use	Value	Justification
		cropping with many water harvesting features	3444	assumed that water harvesting features will enhance infiltration
excess soil water store (ismd)	mm	cropping with no water harvesting features, forestry and gullies	219	value used in previous studies
		cropping with moderate water harvesting features	10,000	water harvesting features will allow retention of substantial amounts of surface water
		cropping with many water harvesting features	1,000,000	water harvesting features will allow retention of substantial amounts of surface water
excess soil water half life (half life)	d	all land uses	3.6	value used in previous studies
maximum rate of ground water recharge (bfiltmax)	mm/d	cropping with no water harvesting features, forestry and gullies	27.9	value used in previous studies
		cropping with moderate water harvesting features	10,000	water harvesting features will reduce interflow and throughflow
		cropping with many water harvesting features	1,000,000	water harvesting features will reduce interflow and throughflow
outflow rate from ground water (bhalflife)	d	all land uses	10	value lower than used in previous studies to account for highly reticulated catchment with shallow soils

HYLUC Calder (2003)

Delgado et al. 2006



Delgado et al. 2006

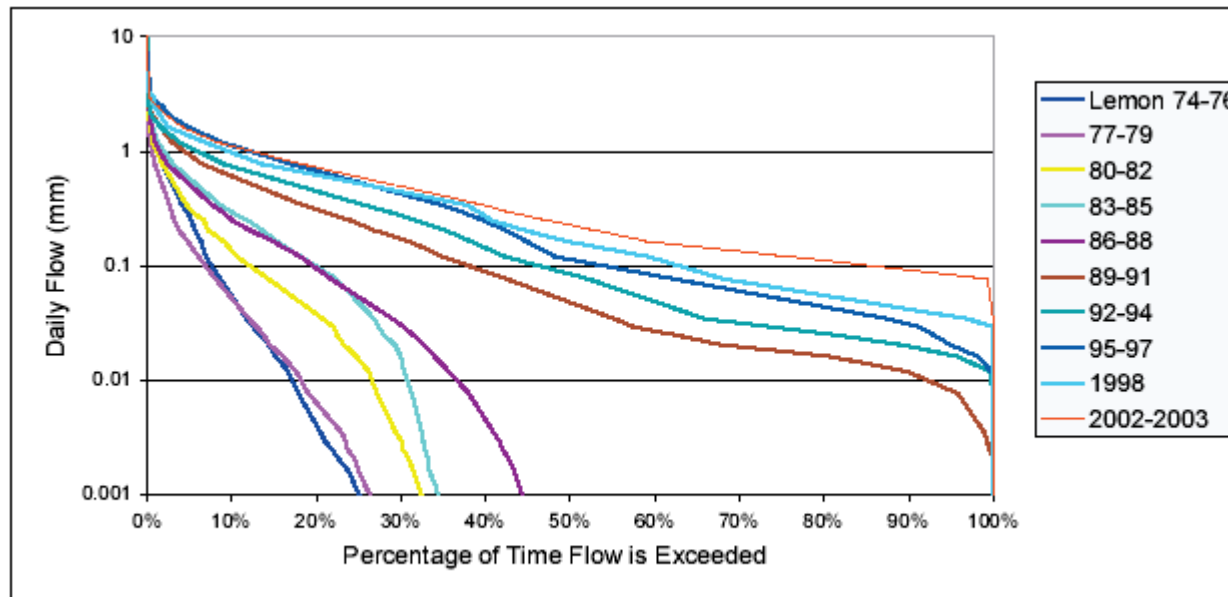
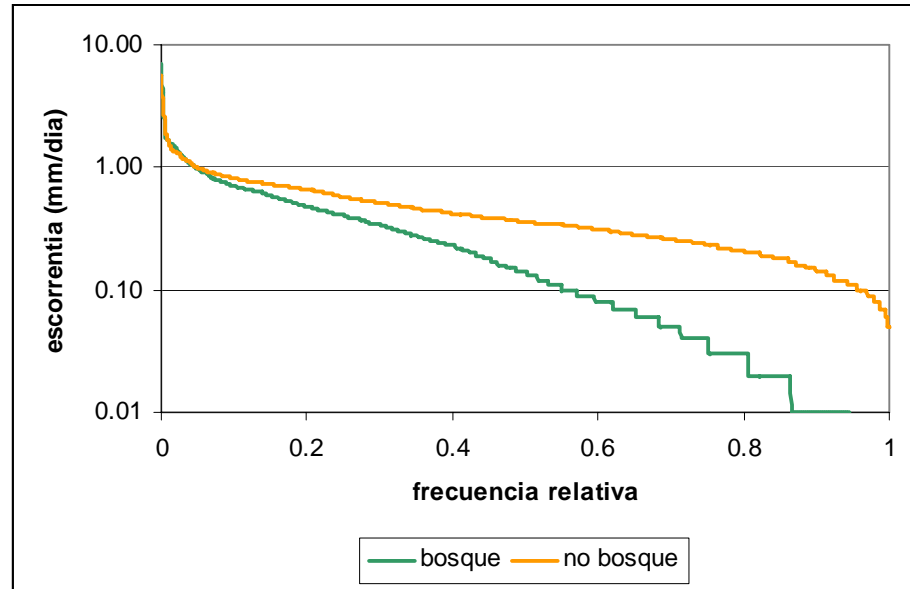
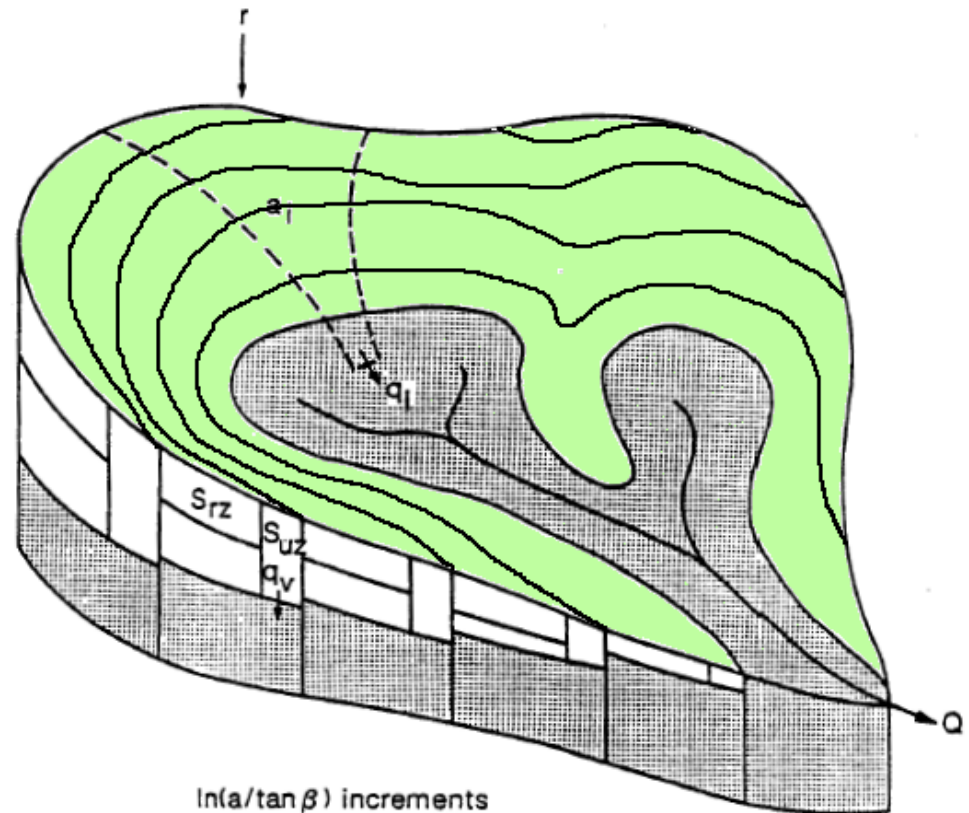


Figure 16. Flow Duration Curves for the Lemon Catchment (lower 50% clear-felled). No data recorded 1999-2001.

TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979)

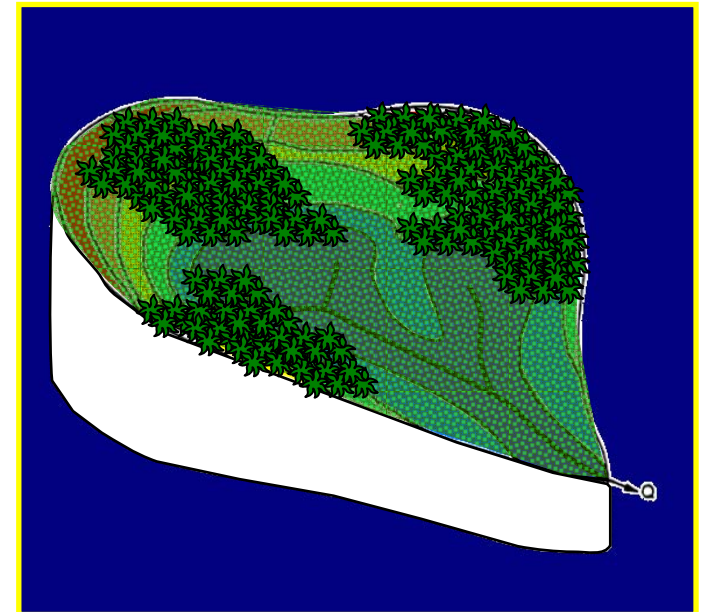
- basado en razonamiento físico



Asunciones:

Vegetación:

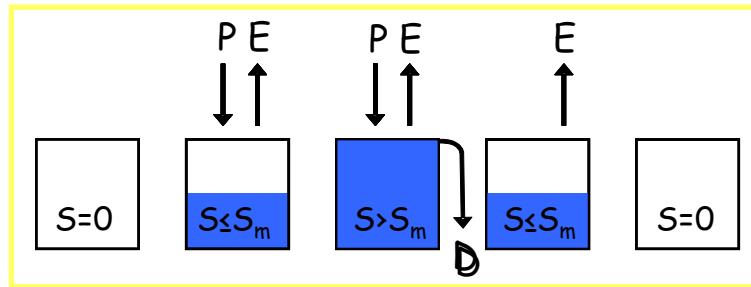
- o Distintos tipos de vegetación en parches.
- o Las cubiertas relativas de estos tipos de vegetación pueden ser diferentes para cada valor de índice topográfico.



interceptación y transpiración:

- o interceptación: modelo tipo 'Rutter' .

$$S = S_{t-1} + P(1-p) - E - D$$

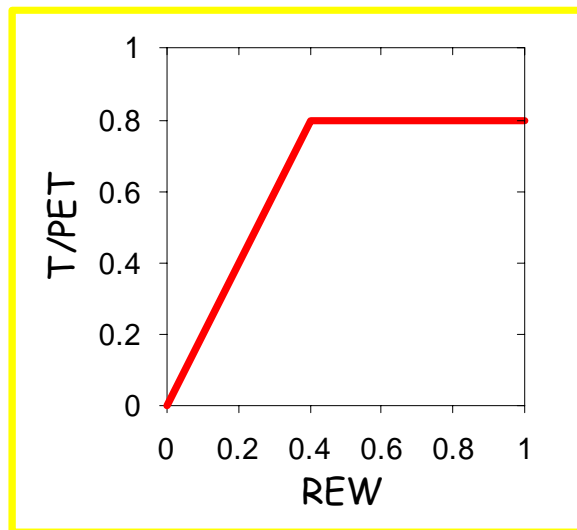


$$S \leq S_m \Rightarrow D = 0; \quad E = E_p \frac{S}{S_m}$$

$$S > S_m \Rightarrow D = S - S_m; \quad E = E_p$$

- o Transpiración: modelo tipo 'Granier'.

$$T = f(PET, REW)$$



$$\theta_i \geq REW \Rightarrow T/PET = TR_m$$

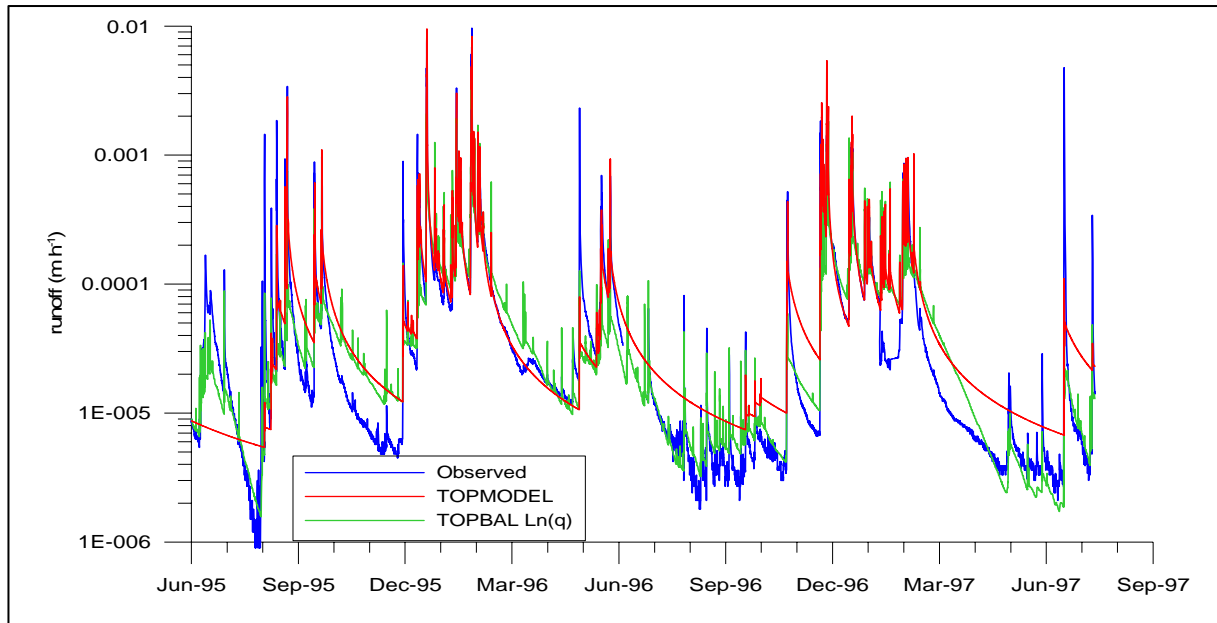
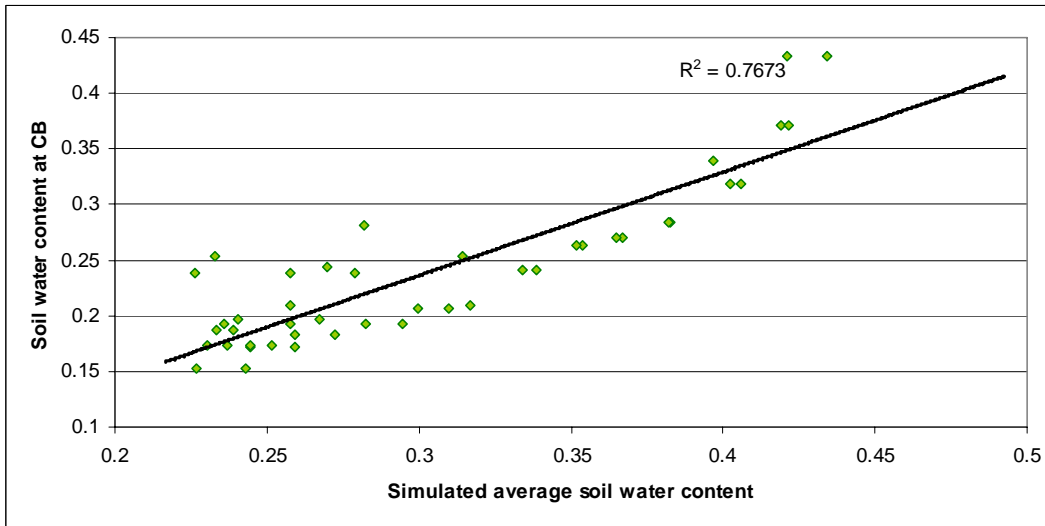
$$\theta_i < REW \Rightarrow T/PET = TR_m \cdot REW / 0.4$$

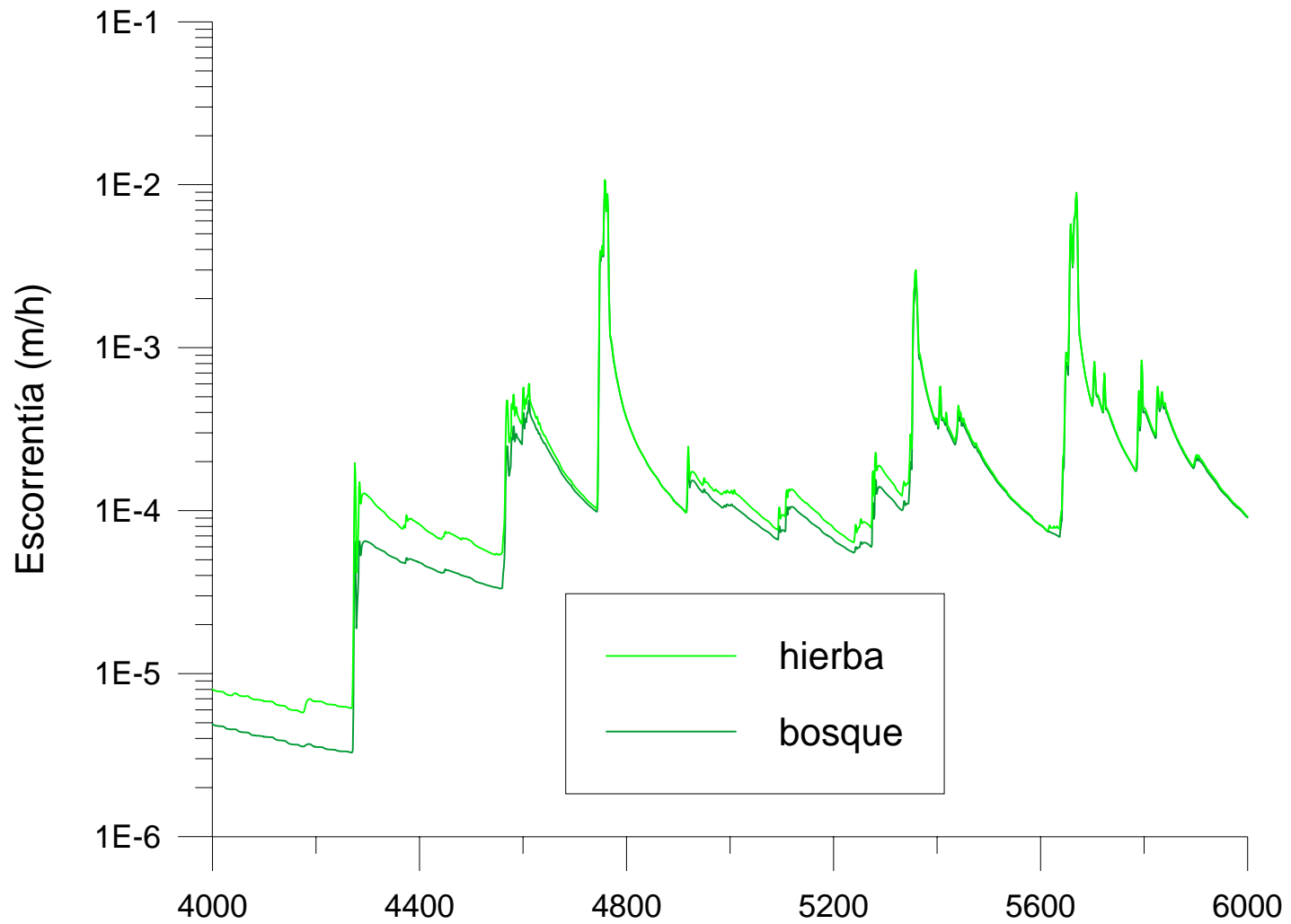
$$REW = \frac{\theta_i - \theta_{WP}}{\theta_{FC} - \theta_{WP}}$$

Simula:

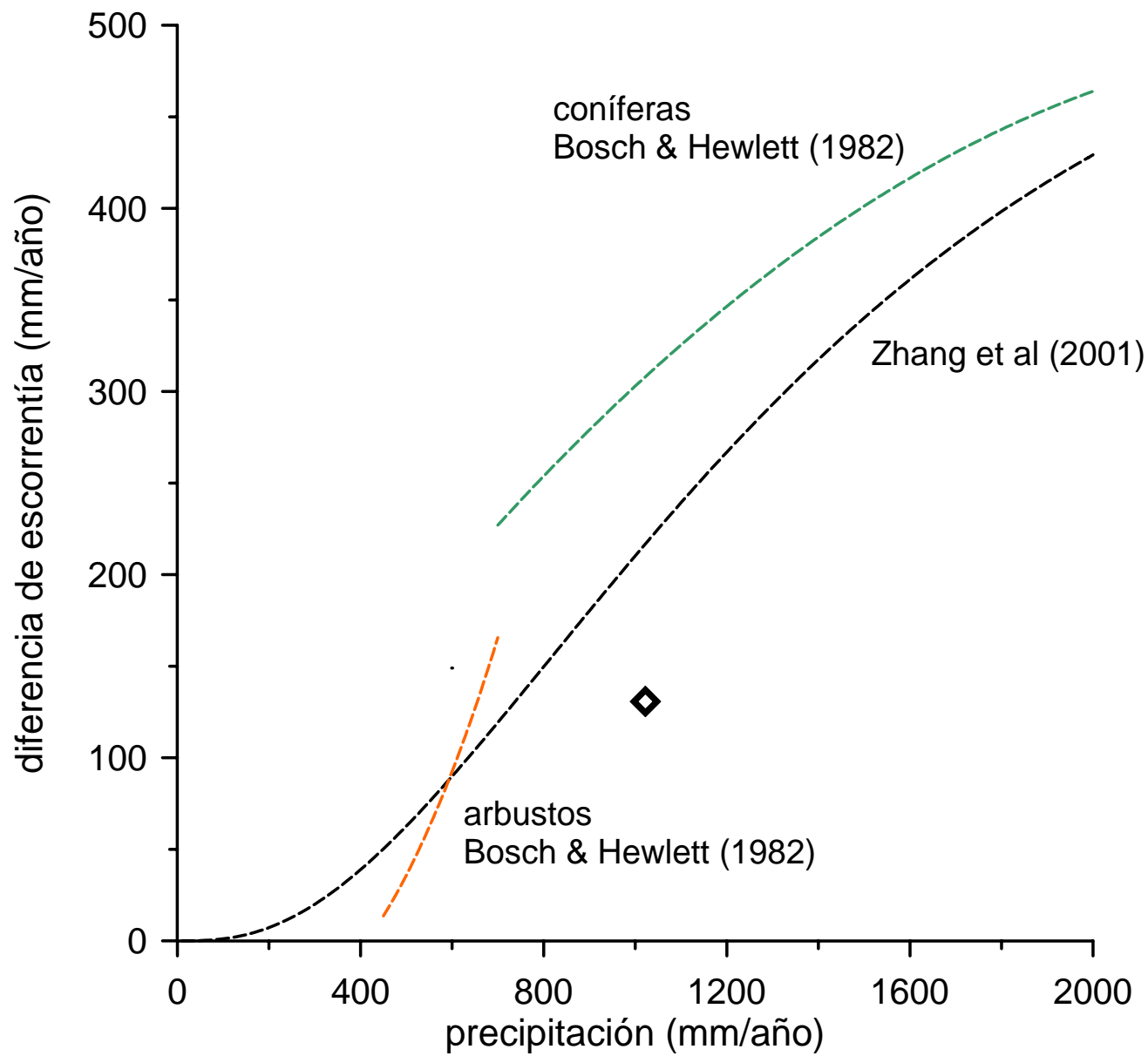
- o Caudal y dos componentes del hidrograma (flujo superficial y flujo de base (subsuperficial))
- o Tanspiración semidistribuida (índice topográfico - vegetación)
- o Nivel freático semidistribuido (índice topográfico)
- o Área contributiva semidistribuida (índice topográfico)
- o Humedad del suelo semidistribuida (índice topográfico - vegetación)

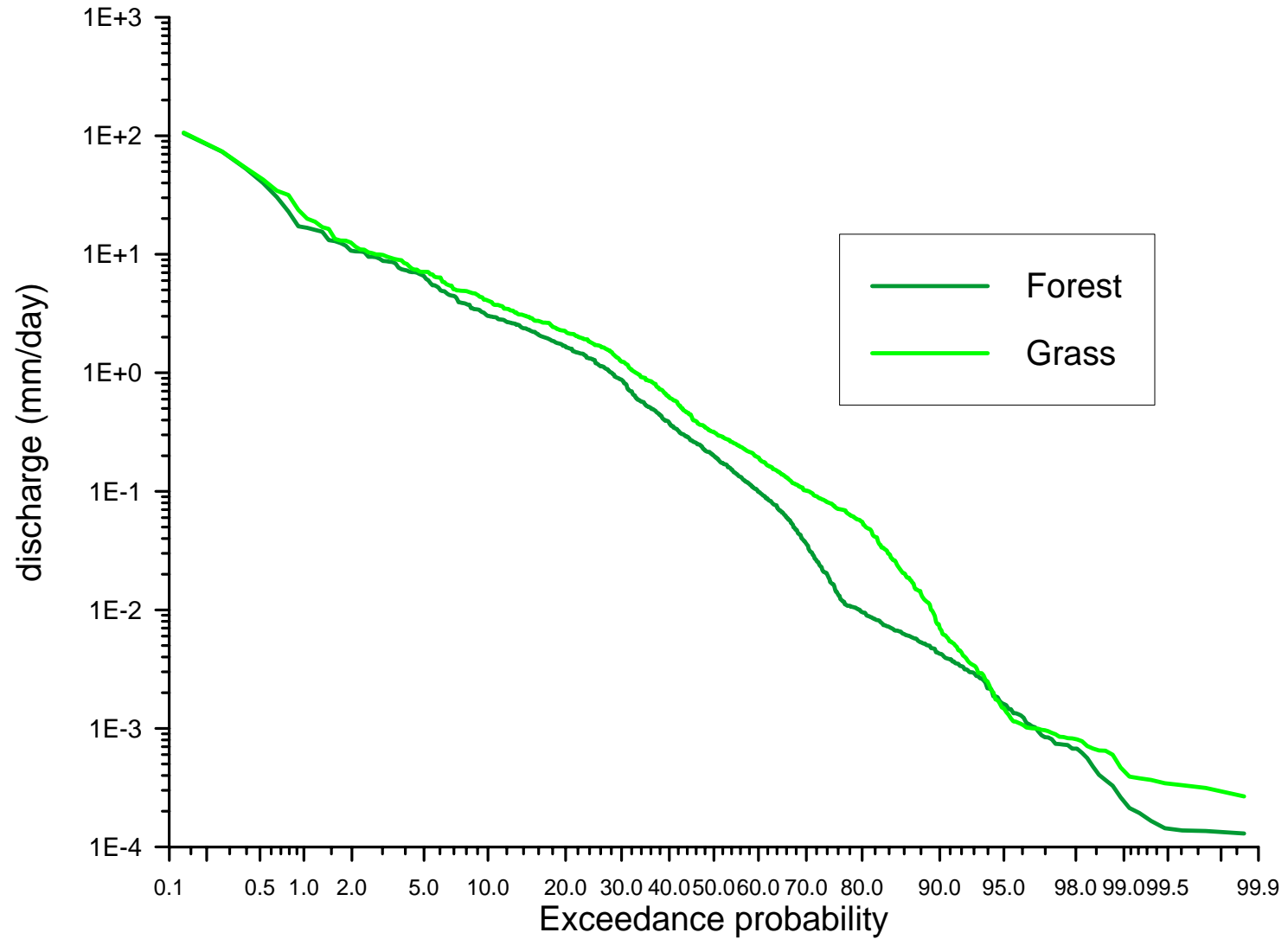
TOPBAL (Llorens et al. 2006)





TOPBAL (Llorens et al. 2006)





**Gracias por
Vuestra atención**



TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979)

$$Q = Q_b + Q_s$$

Q_b = Caudal de base = f (reserva freática)

Q_s = Esc. de saturación = precipitación * área saturada (= f (reserva))

Parámetros:

Topografía: índice topográfico = $\ln(a/\tan b)$

Recesión: forma

Zona insaturada

Flujo en canal:

