



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Doctorado en
Ingeniería del Agua y
Medioambiental

TESIS DOCTORAL

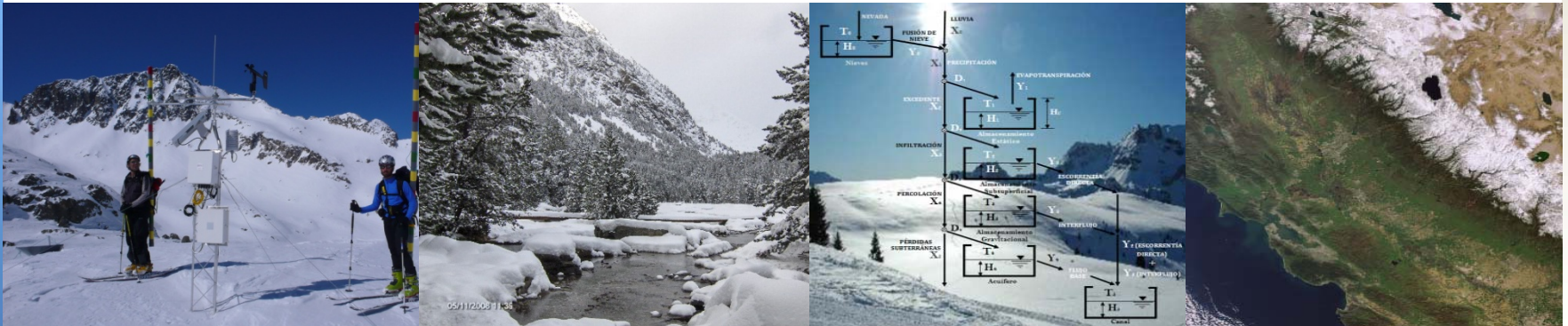
MODELACIÓN PARSIMONIOSA Y ESPACIALMENTE DISTRIBUIDA DE LOS PROCESOS DE ACUMULACIÓN Y FUSIÓN DE NIEVE

Autor

Ismael Orozco Medina

Director

Dr. Félix Francés García





CONTENIDO

- INTRODUCCIÓN
- METODOLOGÍA
- CASOS DE ESTUDIO
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES



GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



ASPECTOS GENERALES

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental

❑ Modelación hidrológica de cuencas de alta montaña

➤ El éxito

- Correcta cuantificación de la fusión

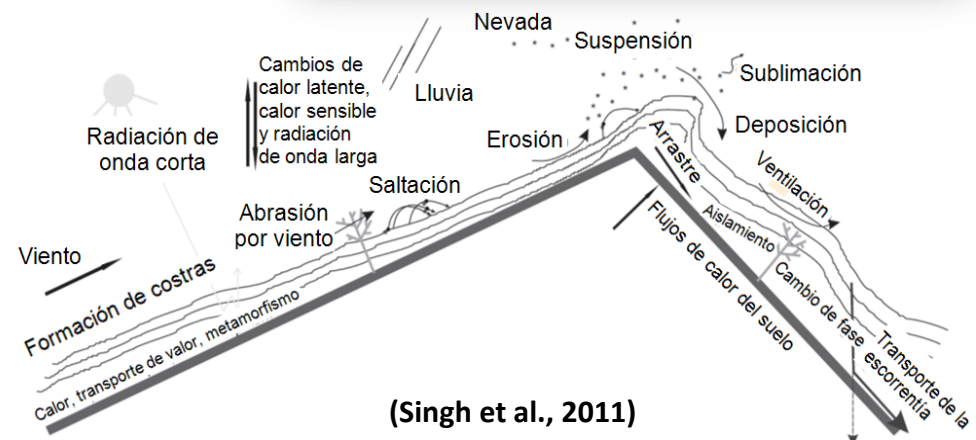
➤ Importancia

- Recursos hídricos
- Producción hidroeléctrica
- Erosión
- Inundaciones

➤ Mayor sensibilidad al Cambio Climático

➤ Problemática

- Procesos físicos
- Propiedades de la nieve
 - Densidad
- Falta de información
 - Zonas de difícil acceso
 - Aislamiento
 - Escasa instrumentación
- Teledetección
 - Imágenes de satélite





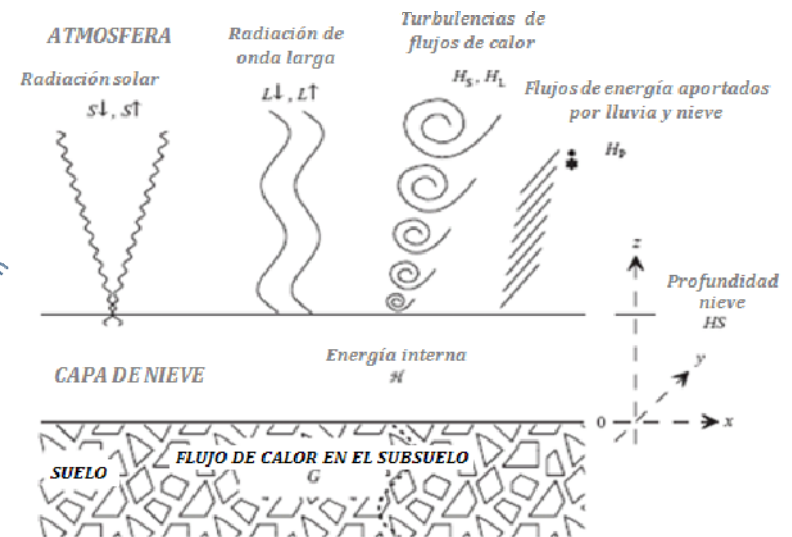
ANTECEDENTES

❑ Cuantificación de la acumulación y fusión

- Modelos estocásticos
- Redes neuronales
- Modelos determinísticos
 - Balance de energía
 - Grado-día
 - Híbridos

GIMHA

Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental



(Armstrong y Brun, 2008)

(Valéry, 2010)

	Balance de energía	Grado-día y Híbridos
Calidad en la simulación de los procesos internos de la nieve	SI (local)	NO (con excepción de algunos enfoques híbridos)
Disponibilidad de los datos de entrada necesarios	NO (la mayoría de las veces los datos de entrada no son medidos)	SI (sólo con el enfoque clásico) NO (a veces para los enfoques híbridos)
Facilidad en la interpolación de los datos de entrada	NO (la variabilidad del viento, etc.)	SI (temperatura del aire)
Facilidad en su aplicación	NO (con la excepción de cuencas bien instrumentadas)	SI
Facilidad en la incorporación a los modelos hidrológicos	NO	SI
Aplicable a cualquier tamaño de cuenca	NO (cuenca medias y pequeñas)	SI (cualquier tamaño de cuenca)
Aplicable a cualquier escala temporal	SI	NO (método clásico) SI (enfoques híbridos)



ANTECEDENTES

❑ Método Grado-día

- Enfoque empírico
 - Glaciares
 - Nieve
- Ha sido muy utilizado (Hock, 2003)
 - Amplia disponibilidad de datos de temperatura del aire
 - Fácil interpolación
 - Buen funcionamiento
 - Simplicidad de cálculo
- Asume una alta correlación entre la temperatura del aire y la fusión

$$M = \begin{cases} DDF(T_a - T_b), & \text{si } T_a \geq T_b \\ 0, & \text{si } T_a < T_b \end{cases}$$

Donde:

M, tasas de fusión (mm)

DDF, es el factor de fusión grado-día ($\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

T_a , temperatura del aire ($^\circ\text{C}$)

T_b , es la temperatura base (0°C)

- Factor de fusión grado-día (DDF)
 - Es un valor homogéneo
 - Martinec (1960)
 - Densidad de la nieve
 - Toshiba (1962)
 - Ubicación, la época del año, meteorología y la radiación solar

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidroológica y Ambiental



ANTECEDENTES

❑ Métodos híbridos

- Formulaciones que han intentado introducir la variabilidad espacial de la acumulación y fusión de nieve
- Resolver cuestiones del método grado-día
 - Deficiencias evidentes en precisión (Hock, 2003)
 - Variabilidad espacial de la fusión (Hock, 2003)
- Simplificación (Kling et al., 2006)
- Literatura se encuentran formulaciones

- Método grado-día
- Consideran los flujos por radiación
- Kustas et al. (1994)

$$M = \frac{Q_s + Q_l}{\rho_w \cdot L_f} + DDF \cdot T_a$$

- Cazorzi y Dalla Fontana (1996)

$$M_{hj} = CMF \cdot EI_j \cdot Ta_{hj}$$

- Hock (1999)

$$M = \begin{cases} \left(\frac{1}{n} \cdot DDF + \alpha_{nieve/hielo} I \frac{G_s}{I_s} \right) \cdot T_a & : T_a > 0 \\ 0 & : T_a \leq 0 \end{cases}$$

- Kling (2006)

$$M = \begin{cases} Ta \cdot (MF + \beta I) \Delta t & \text{para } Ta > 0^\circ\text{C} \\ 0 & \text{para } Ta \leq 0^\circ\text{C} \end{cases}$$

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidroológica y Ambiental



MOTIVACIÓN

❑ Hock (1999)

- La variabilidad espacial de la fusión no es modelada correctamente con el método grado-día, porque el factor DDF es asumido como un valor constante e invariante en el espacio y en el tiempo.

❑ DeWalle y Rango (2008)

- El factor DDF es modificado
 - La época del año
 - La cubierta vegetal
 - La topografía
 - El área de cubierta de nieve
 - La contaminación de la superficie de la nieve
 - Las condiciones atmosféricas y la lluvia

GIMHIA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidroológica y Ambiental



OBJETIVOS



□ General

- El objetivo general de esta tesis es introducir la variabilidad espacial y temporal del factor de fusión grado-día, a través de un modelo matemático de fusión parsimonioso. Así, como evaluar los efectos de esta variabilidad en la modelación hidrológica de cuencas de alta montaña, tanto en la simulación de la producción de escorrentía, como en la modelación de los procesos de acumulación y fusión de nieve.

□ Específicos

- El desarrollo de uno o varios modelos híbridos de fusión que consideren la variabilidad del factor de fusión grado-día y que tomen en cuenta la radiación global de onda corta para la fusión de nieve.
- La construcción de mapas de variabilidad de los factores de fusión desde un punto de vista parsimonioso y utilizando la información habitualmente disponible en su determinación.
- La calibración automática de los parámetros de los modelos de fusión a través de un algoritmo de optimización.
- Evaluar los alcances de la variabilidad de los factores de fusión grado-día y las formulaciones matemáticas propuestas en dos escalas diferentes.



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

METODOLOGÍA

CASOS DE ESTUDIO

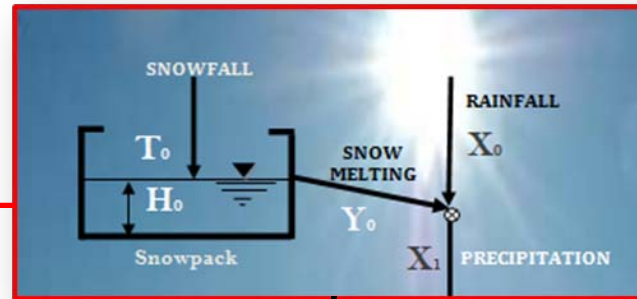
RESULTADOS

CONCLUSIONES

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidroológica y Ambiental



METODOLOGÍA



MODELOS HÍBRIDOS DE FUSIÓN
(MHO; Hock, 1999; Cazorzi y Dalla Fontana 1996; Kling, 2006)

Mapas de índices de radiación (MIR)

Mapas de factores DDF (MDDF)

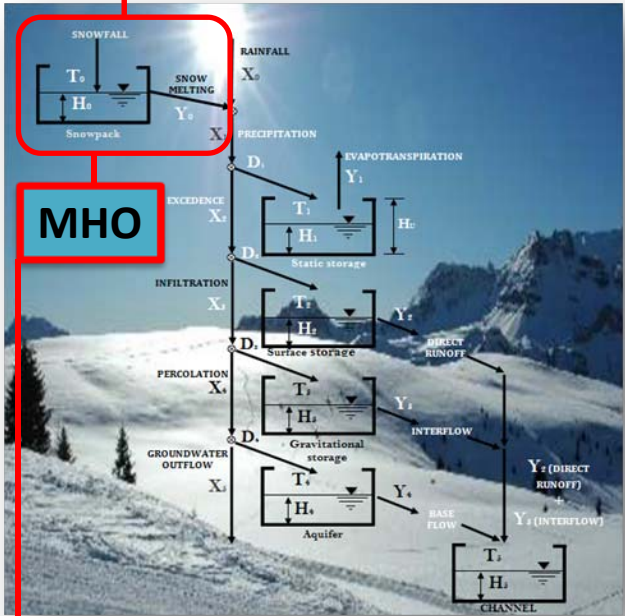
CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA

Shuffled Complex Evolution SCE-UA
(Duan et al., 1992)

Índice de Nash y Sutcliffe (-∞ a 1)

Parámetros:
Modelo TETIS
Modelos de fusión

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{obs(t)} - Q_{sim(t)})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{obs(t)} - \bar{Q}_{obs})^2}$$



MHO

Modelo hidrológico TETIS
(Francés et al., 2012)

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



MODELOS DE FUSIÓN

❑ Modelo MHO

- Método grado-día clásico
 - *Input* (precipitación y temperatura)
 - Diferencia lluvia/nieve
 - *Output* (Tasas de fusión y SWE)

❑ Conceptualizaciones Híbridas

- Se basan en el MHO y formulaciones encontradas en la literatura
- Inicialmente se probaron nueve conceptualizaciones
 - albedo, radiación de onda corta y larga (descartado albedo)
- **Híbrido 1**

$$M_{(i)} = \begin{cases} \left[Mf_{1,2} \cdot I_{R(i)} \right] \cdot \left[T_{a(i)} - T_b \right], & \text{si } T_{a(i)} \geq T_b \\ 0, & \text{si } T_{a(i)} < T_b \end{cases}$$

$$M_{(i)} = \begin{cases} DDF_{1,2} \cdot \left[T_{a(i)} - T_b \right], & \text{si } T_{a(i)} \geq T_b \\ 0, & \text{si } T_{a(i)} < T_b \end{cases}$$

donde:

- **M**, Tasas de fusión (mm)
- **DDF₁**, factor de fusión homogéneo sin lluvia (mm °C⁻¹ d⁻¹)
- **DDF₂**, factor de fusión homogéneo con aportes de energía por lluvia
- **T_{a(i)}**, temperatura del aire en cada celda (mín. o med.)
- **T_b**, temperatura base o umbral (0°C)

donde:

- **I_{R(i)}**, valor del **índice de radiación de onda corta** para cada celda tomado del **mapa MIR (1 y 6 mapas)**
- **Mf₁ * I_{R(i)}** corresponde al factor **DDF₁** distribuido sin lluvia (mm °C⁻¹ d⁻¹)
- **Mf₂ * I_{R(i)}** corresponde al factor **DDF₂** distribuido con aportes de energía por lluvia

GIMHA
 Grupo de Investigación de Modelación
 Hidrológica y Ambiental



MODELOS DE FUSIÓN

➤ Híbrido 2

$$M_{(i)} = \begin{cases} \left[Mf_{1,2} + \alpha I_{R(i)} \right] \cdot \left[T_{a(i)} - T_b \right], & \text{si } T_{a(i)} \geq T_b \\ 0, & \text{si } T_{a(i)} < T_b \end{cases}$$

donde:

- α , coeficiente de conversión de índices ($\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$)
- $I_{R(i)}$, valor del **índice de radiación de onda corta** para cada celda tomado del **mapa MIR (6 mapas)**
- $Mf_1 + \alpha I_{R(i)}$, corresponde al factor **DDF₁** distribuido sin lluvia ($\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$)
- $Mf_2 + \alpha I_{R(i)}$, corresponde al factor **DDF₂** distribuido con aportes de energía por lluvia ($\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

➤ Híbrido 3

$$M_{(i)} = \begin{cases} \left[Mf_{1,2(i)} + \alpha I_{R(i)} \right] \cdot \left[T_{a(i)} - T_b \right]; & \text{Si } T_{a(i)} \geq T_b \\ 0; & \text{Si } T_{a(i)} < T_b \end{cases}$$

donde:

- $Mf_{1,2(i)}$, valor del **factor DDF** para cada celda tomado del **mapa MDDF (1 mapa)** [$\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$]
- α , coeficiente de conversión de índices ($\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$)
- $I_{R(i)}$, valor del **índice de radiación de onda corta** para cada celda tomado del **mapa MIR (1 y 6 mapas)**
- $Mf_{1(i)} + \alpha I_{R(i)}$ corresponde al factor **DDF₁** distribuido sin lluvia ($\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$)
- $Mf_{2(i)} + \alpha I_{R(i)}$ corresponde al factor **DDF₂** distribuido con aportes de energía por lluvia ($\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

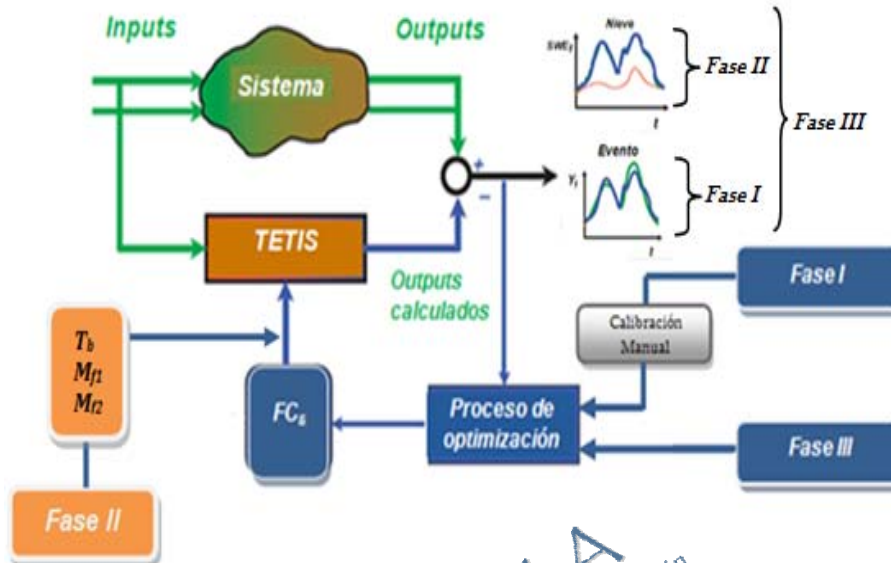
GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidroológica y Ambiental



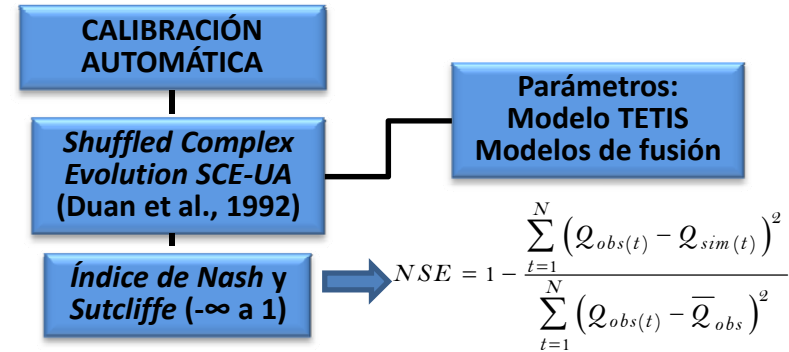
CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS

Calibración automática

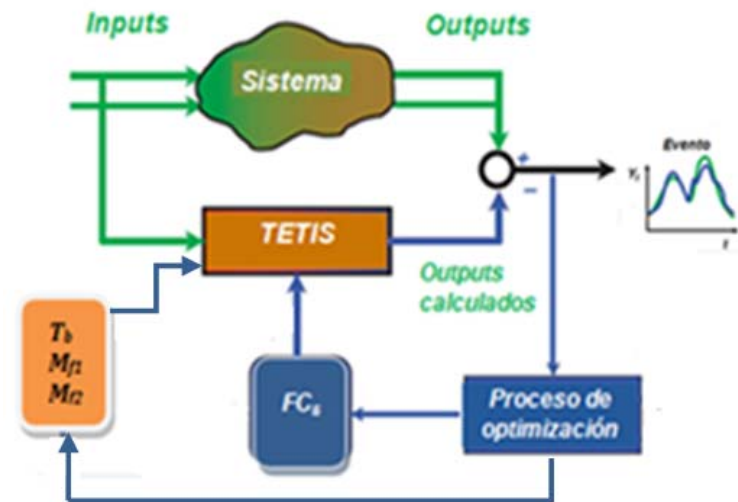
- Calibración por fases de los parámetros



GIMHA
 Grupo de Investigación de Modelación
 Hidrológica y Ambiental



- Calibración conjunta de los parámetros

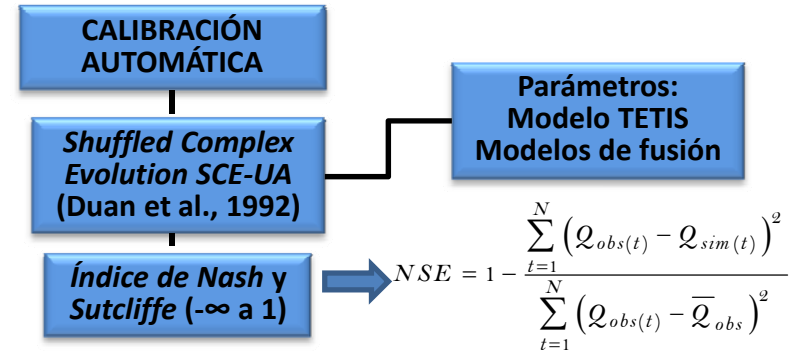




CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS

❑ Calibración automática

- Calibración por fases de los parámetros
- Parámetros a calibrar automáticamente



Modelo	Parámetros a calibrar	Parámetro efectivo
Homogéneo	Factor de fusión grado-día (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	DDF1*
	Factor de fusión grado-día con aportes de energía por lluvia (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	DDF2*
	Temperatura base (°C)	Tb*
Híbrido 1	Factor de fusión sin distribuir (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	Mf1*
	Factor de fusión sin distribuir con aportes de energía por lluvia (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	Mf2*
	Temperatura base (°C)	Tb*
Híbrido 2	Factor de fusión sin distribuir (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	Mf1*
	Factor de fusión sin distribuir con aportes de energía por lluvia (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	Mf2*
	Coefficiente de conversión de índices (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	α*
	Temperatura base (°C)	Tb*
Híbrido 3	Mapa de factores de fusión (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	Mf1(i)*= fcn1·Mf1(i)
	Mapa de factores de fusión grado-día con aportes de energía por lluvia (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	Mf2(i)*= fcn2·Mf2(i)
	Coefficiente de conversión de índices (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	α*
	Temperatura base (°C)	Tb*

GIMHA

Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

METODOLOGÍA

CASOS DE ESTUDIO

RESULTADOS

CONCLUSIONES

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

❑ Proyecto DMIP2

- NOAA
- Sierra Nevada, EE. UU.
 - Subcuenca del río Carson
 - Subcuenca del río American

❑ Área

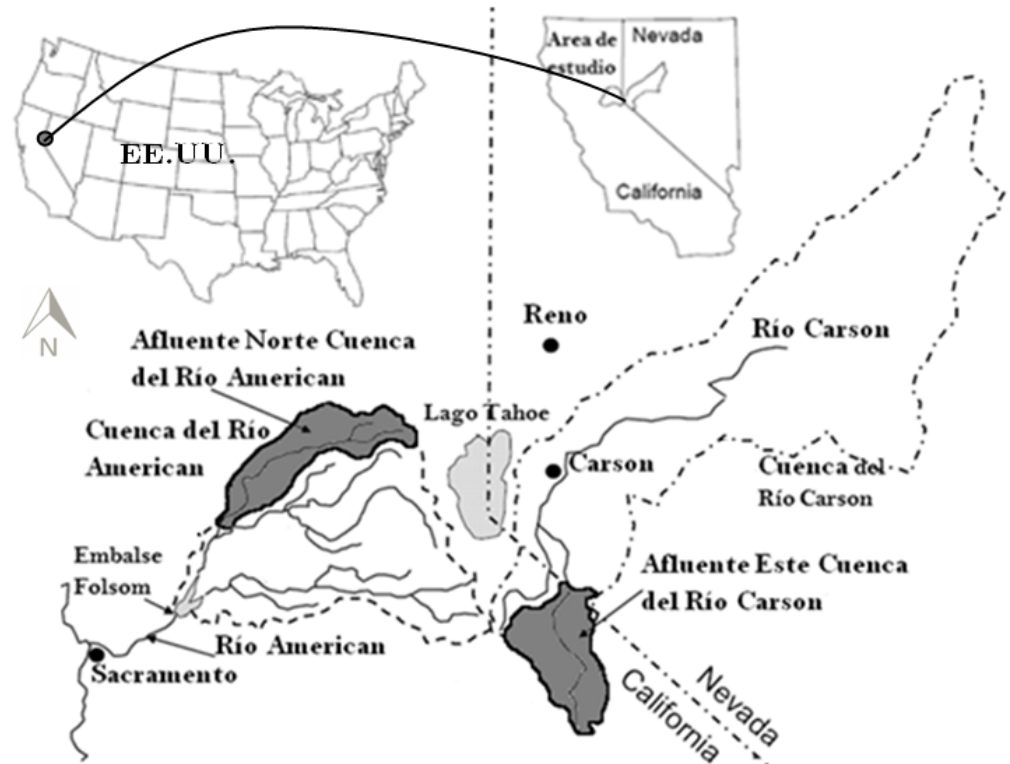
- Carson: 922 km²
- American: 886 km²

❑ Régimen hidrológico

- Nieve: 1,539-3,407 m (Carson)
- Mixto: 281-2,630 m (American)

❑ Precipitaciones

- Carson: 559 -1,244 mm/año (1,722 -2,438 m)
- American: 813 -1,651 mm/año (393-1,676 m)



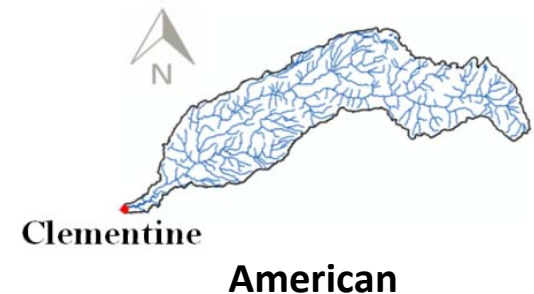
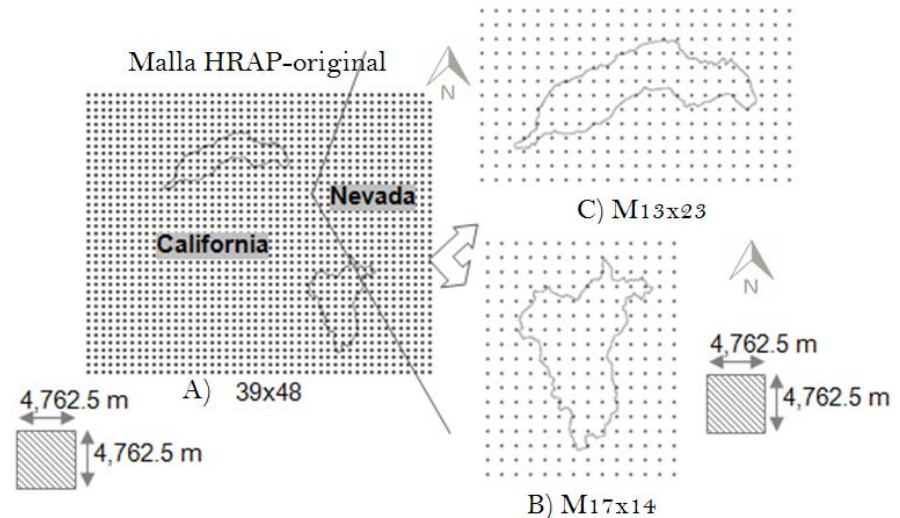
(Jeton et al., 1996)



CUENCAS DE SIERRA NEVADA

□ Información hidrometeorológica

- Precipitación
 - 15 años (1987-2002)
 - Horarios
- Temperatura medias
 - 15 años (1987-2002)
 - Horarios
- ETP (mensual)
- Caudales
 - Horarios (Instantáneos)
 - 14 años (1988-2002)



GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



CUENCAS DE SIERRA NEVADA

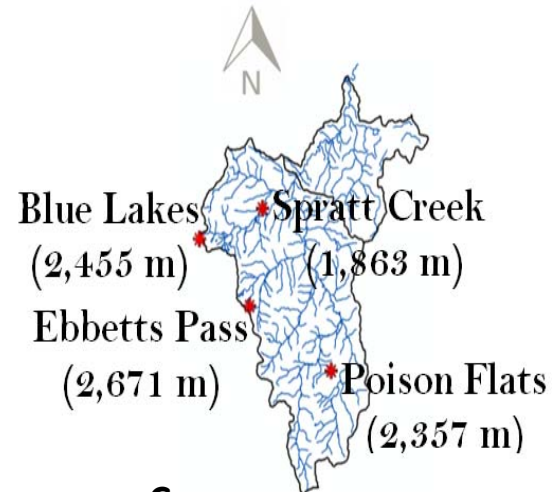
□ Información de nieve

- Seis estaciones SNOTEL
 - SWE (15 años)
 - Diarios

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidroológica y Ambiental



American



Carson

□ Cubiertas de mantos de nieve

- 254 imágenes de satélite (1990-1997)
- Resolución de 1 km

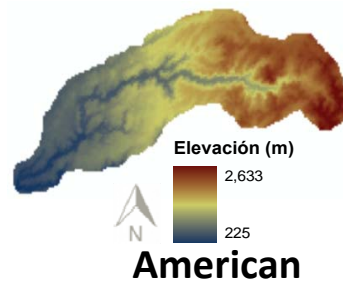
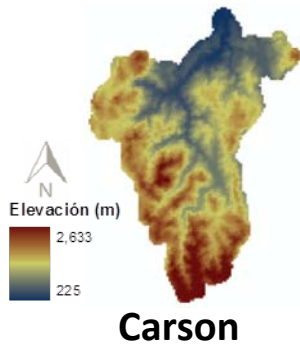




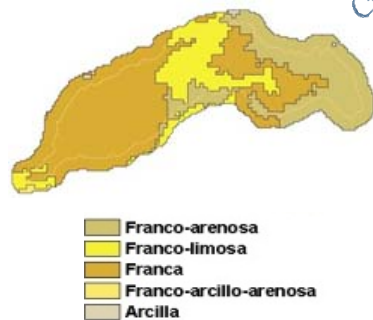
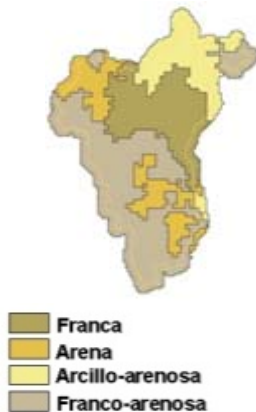
CUENCAS DE SIERRA NEVADA

Información espacial

- DEM (400 m)



- Edafología (resolución 1 km)



- Ocupación de suelo (1 km)



- Geología

- Rocas ígneas metamórficas, basaltos, areniscas poco consolidadas o rocas carbónicas fracturadas

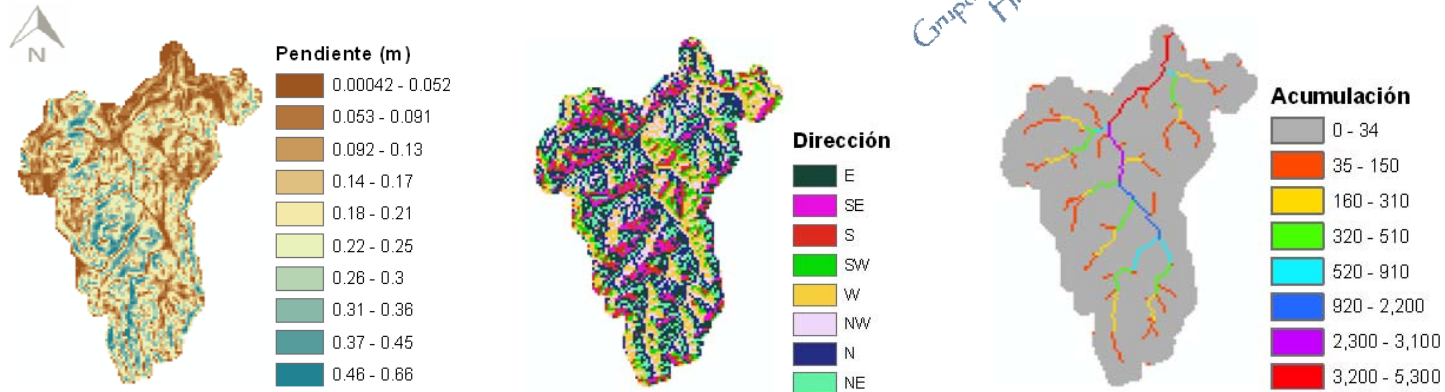


CUENCAS DE SIERRA NEVADA

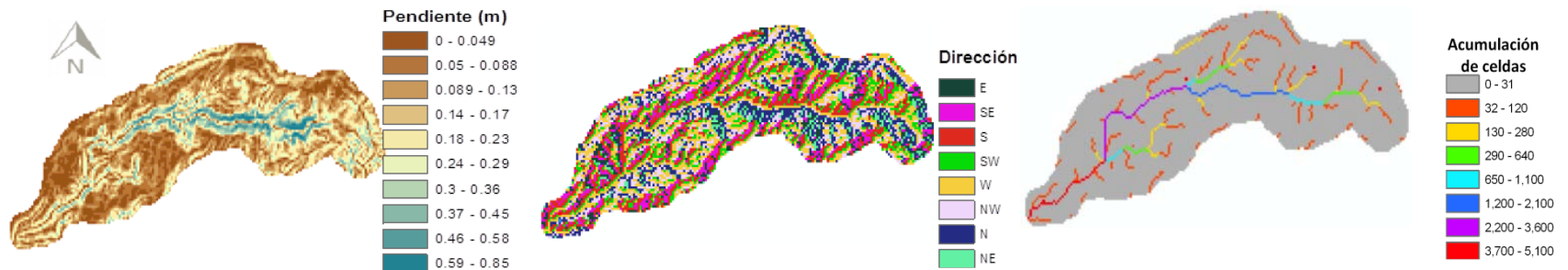
GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental

Mapas derivados del DEM

➤ Subcuenca del río Carson



➤ Subcuenca del río American



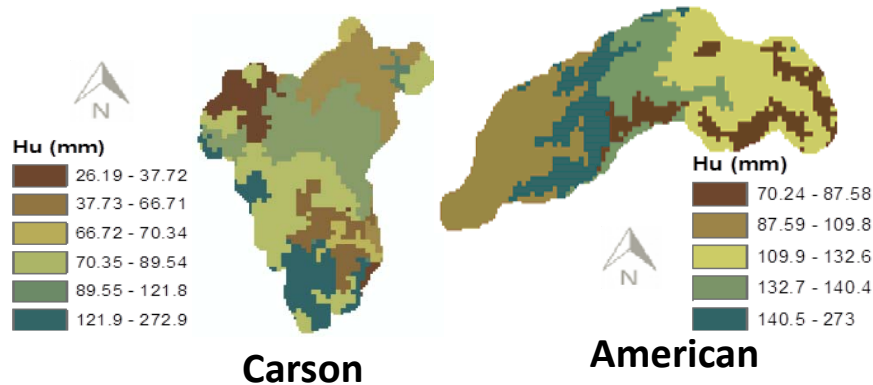


CUENCAS DE SIERRA NEVADA, EE. UU.

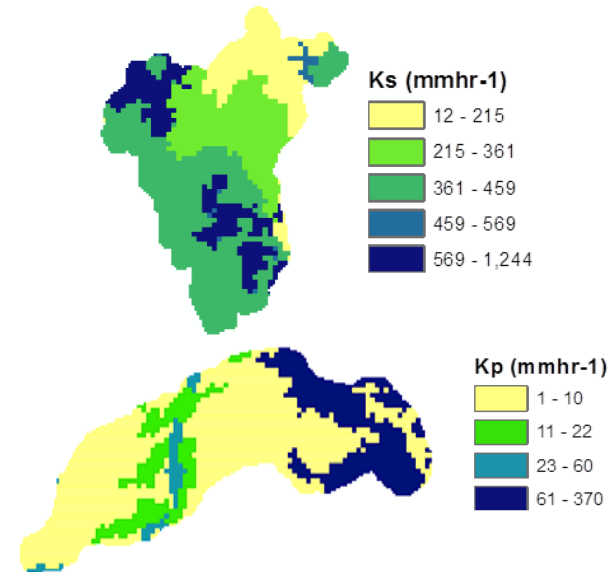


Parámetros del modelo hidrológico TETIS

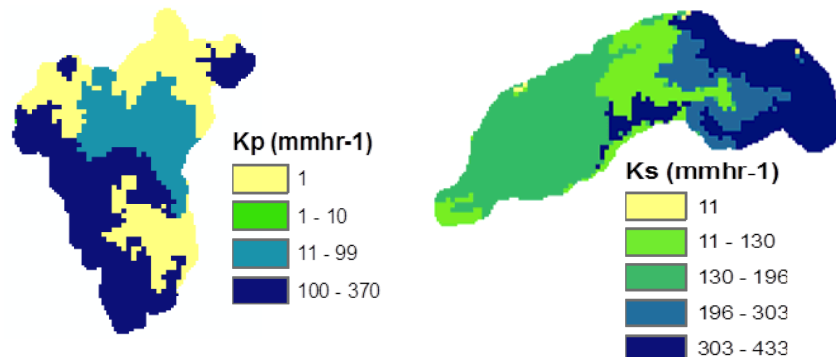
➤ Almacenamiento capilar del suelo (Hu)



➤ Capacidad de percolación (Kp)



➤ Capacidad de infiltración (Ks)



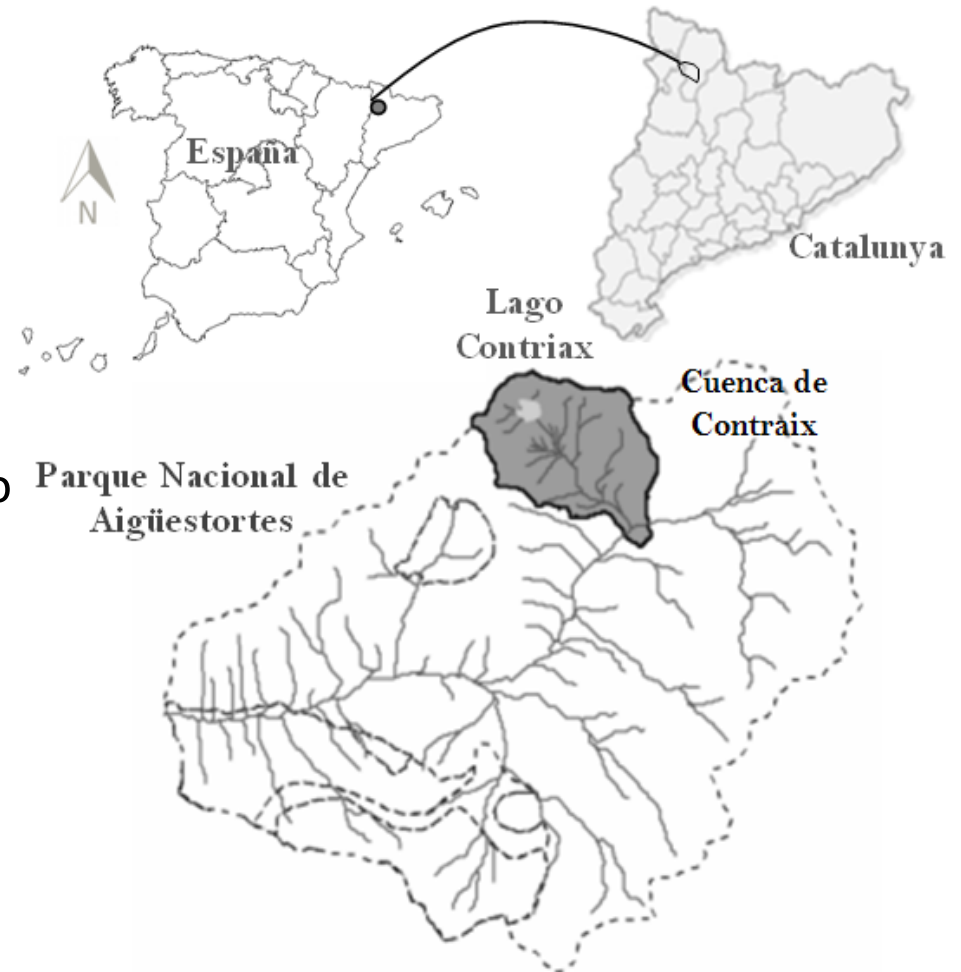
➤ Índice de cubierta vegetal

Cubierta vegetal	λ (mes)					
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	...
Bosque perenne	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
Bosque caducifolio	0.6	0.6	0.8	1.0	1.0	
Bosque mixto	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	
Bosque, monte, selva	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	
Prado arbolado	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	



CUENCA DE CONTRAIX

- ❑ **Proyecto ACOPLA**
- ❑ **Área:** 4.8 km²
- ❑ **Elevación:** 1,967-2,958 m
- ❑ **Régimen hidrológico:** nieve
- ❑ **Precipitaciones:** 1,400 mm/año
- ❑ **Ocupación de suelo**
 - Prados de alta montaña
 - Rocas expuestas
 - Bosques de pinus uncinata
- ❑ **Litología:** Biotita-granodiorita



GIMHA

Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



CUENCA DE CONTRAIX

GIMHA

Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental

□ Información hidrometeorológica

➤ Precipitación y temperatura (0.5 h)

- E. Contraix (09/2010-10/2011)
- E. Llebreta (11/2009-08/2011)

➤ ETP (mensual)

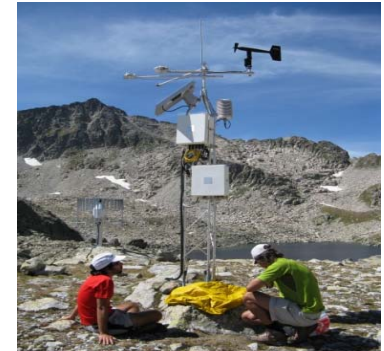
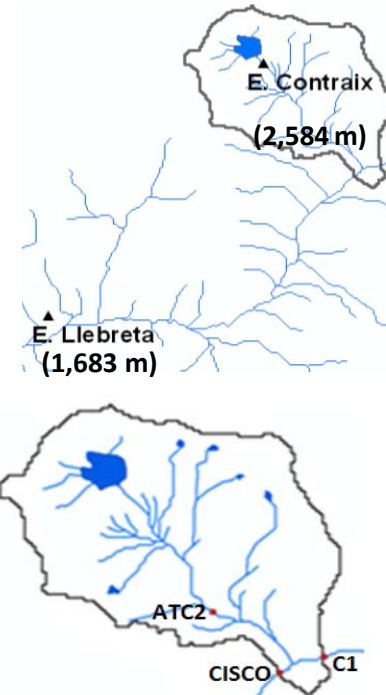
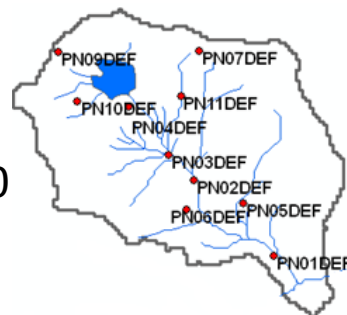
- *Penman-Monteith* de la FAO

➤ Caudales

- 05/2009-08/2011
- Instantáneos (0.5 h)

➤ Nieve

- Densidad
- Profundidad
- 10/2009-09/2010



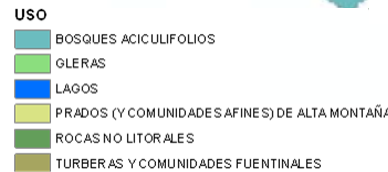


CUENCA DE CONTRAIX

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental

Información espacial

- Ocupación de suelo
- Muestras de suelo (16)

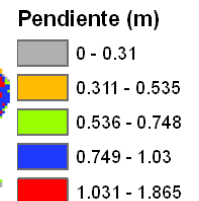
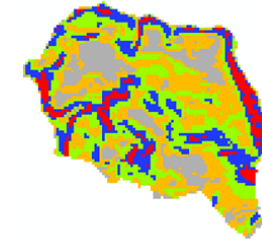
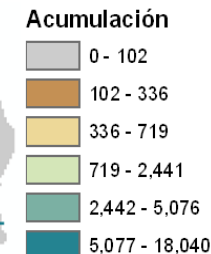
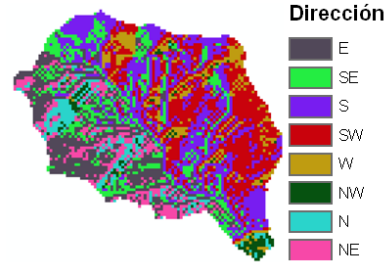
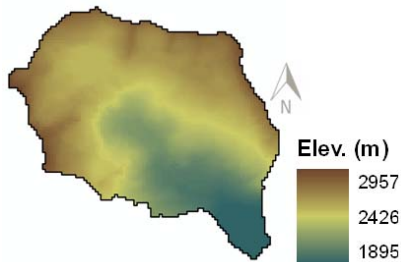


Catas en campo



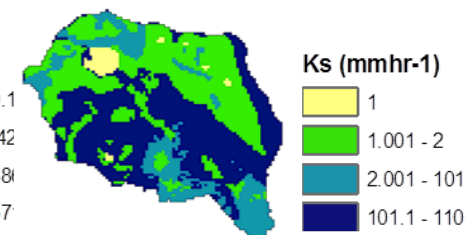
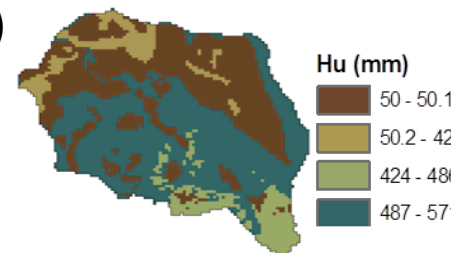
Mapas derivados del DEM

- DEM (30 m)



Parámetros del modelo TETIS

- Almacenamiento capilar del suelo (Hu)
- Capacidad de infiltración (Ks)
- Capacidad de percolación (Kp)
- Índice de cubierta vegetal



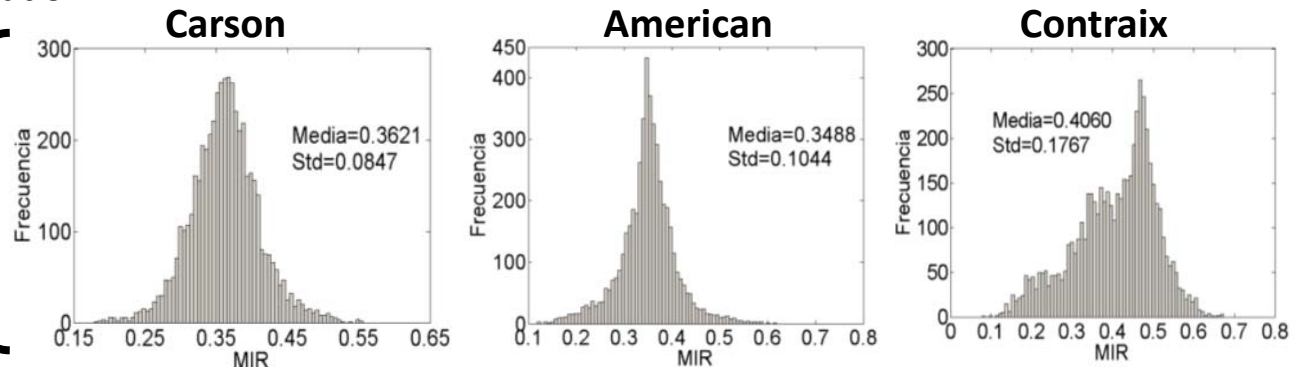


CONSTRUCCIÓN DE LOS MAPAS DE VARIABILIDAD

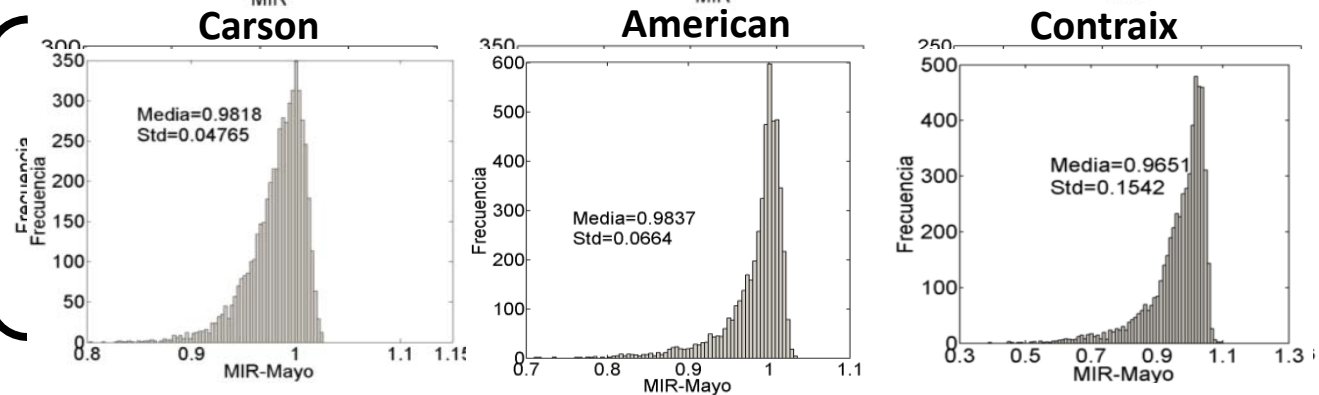
Mapas de índices de radiación onda corta (MIR)

- La pendiente, la orientación, la sombra de relieve y el ángulo cenital
- Construcción
 - DEM (400 m y 30 m)
 - ArcGIS-script *Area solar radiation-Viewshed* (Rich et al., 1994)
 - A cielo despejado
 - Latitud

➤ 1 mapa MIR



➤ 6 mapas MIR



GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



CONSTRUCCIÓN DE LOS MAPAS DE VARIABILIDAD

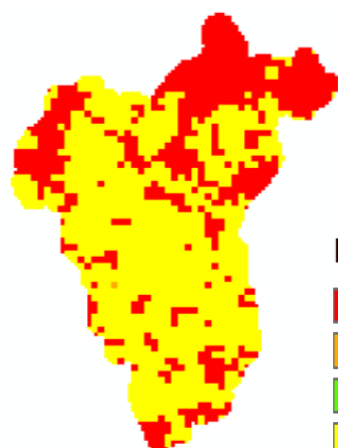
Mapas de factores de fusión (MDDF)

- Radiación de onda larga por vegetación
- Construcción
 - Usos de suelo
 - Factores DDF

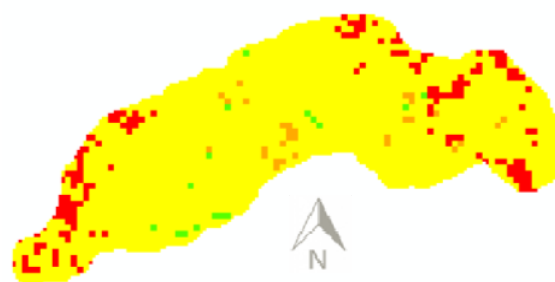
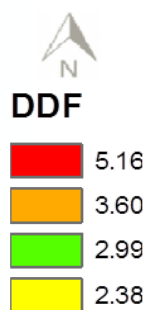
GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental

(Bengtsson y Semádeni-Davies, 2011; Martinec y Rango, 1986; Gray y Prowse, 1992)

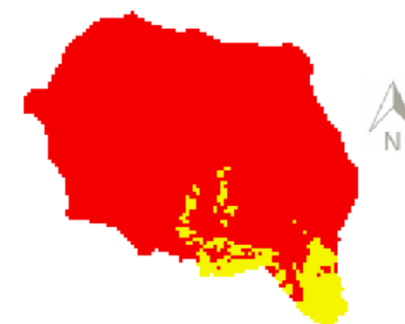
Clasificación	DDFnieve (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	DDFmed.nieve (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)
Desnudo y prados	2.82-7.50	5.16
Bosque caducifolio	2.70-4.50	3.60
Bosque de coníferas	1.40-3.36	2.38
Bosques mixtos	=	2.99



Carson



American



Contraix



CONTENIDO

- INTRODUCCIÓN
- METODOLOGÍA
- CASOS DE ESTUDIO
- RESULTADOS**
- CONCLUSIONES

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



RESULTADOS: VARIABILIDAD DE LOS FACTORES DE FUSIÓN Y SU EFECTO EN LA MODELACIÓN

□ PRIMERA PARTE

- Las cuencas de Sierra Nevada EE. UU.

Conceptualización	Mapas	Modelo
Grado-día-homogéneo	=	MHO
Híbrido 1	1 MIR	MíBI1-1
	6 MIR	MíBI1-6
Híbrido 2	6 MIR	MíBI2-6
Híbrido 3	1 MDDF y 1 MIR	MíBIV3-2
	1 MDDF y 6 MIR	MíBIV3-7

- Resultados
 - La modelación de los caudales
 - La modelación de la nieve (acumulación y fusión)
 - Proyecto DMIP2

□ SEGUNDA PARTE

- La cuenca de Contraix
- Resultados
 - La modelación de los caudales
 - La modelación de la nieve (acumulación y fusión)

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental

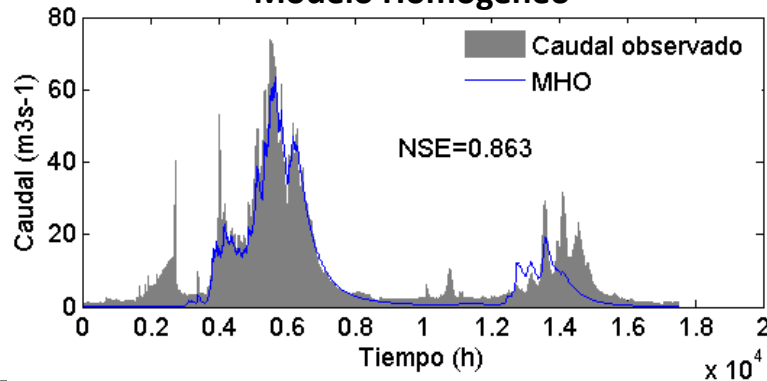


MODELACIÓN DE LOS CAUDALES EN SIERRA NEVADA

Calibración en Carson

- Estación de control: *Gardnerville*
- Condiciones iniciales (calentamiento)
- P. calibración: 01/10/1992-30/09/1994
- Eficiencias
 - NSE=0.84-0.88
 - RMSE=4.15-4.84 m³s⁻¹
 - Error en vol.=16.91-20.38 %

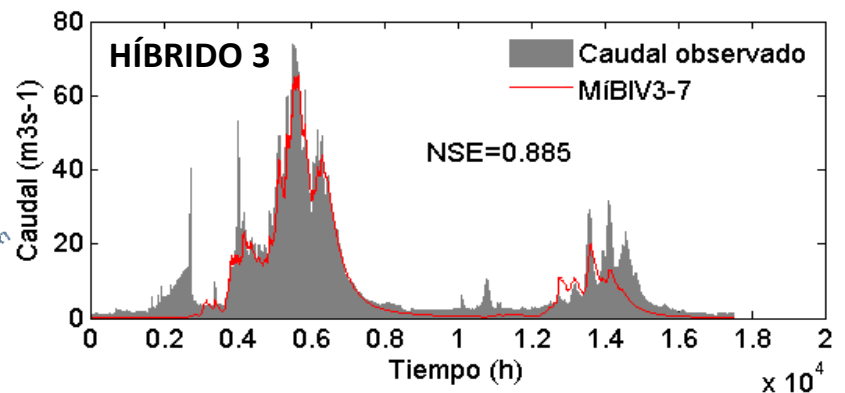
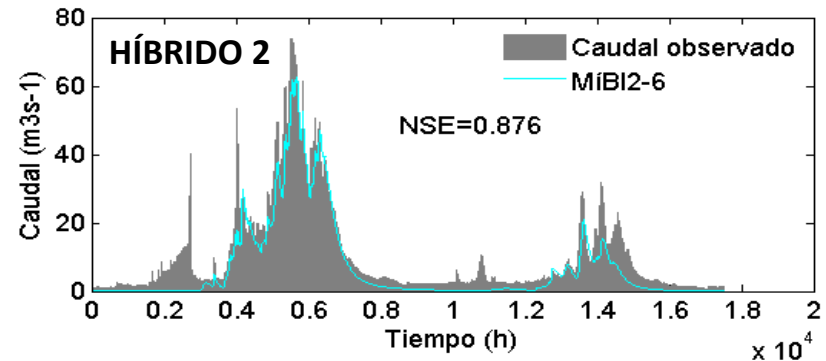
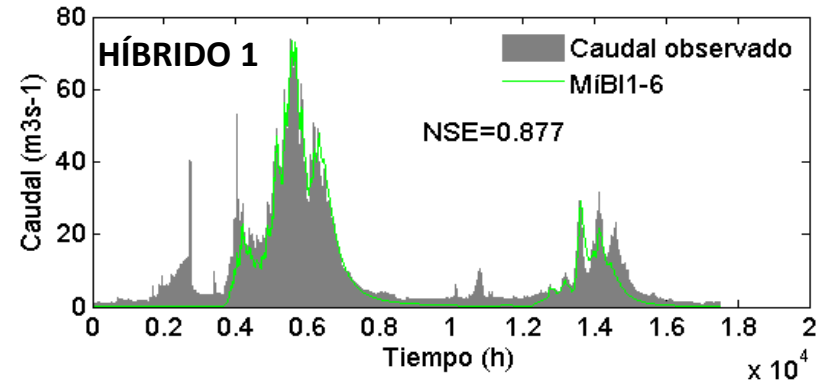
Modelo Homogéneo



Verificaciones

- Parámetros modelo TETIS
- Parámetros M. de fusión
- Balance hidrológico

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



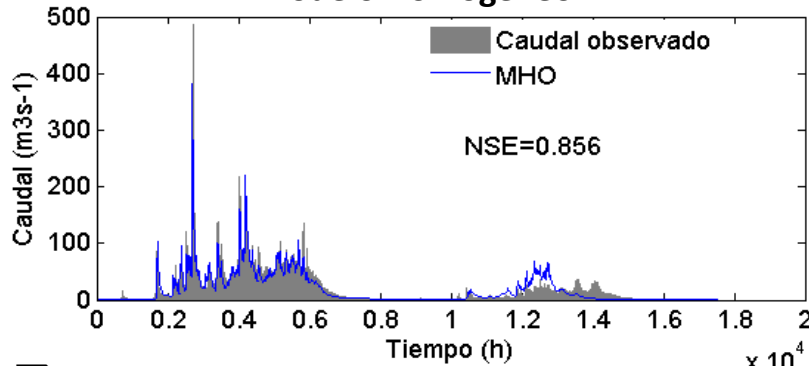


MODELACIÓN DE LOS CAUDALES EN SIERRA NEVADA

Calibración en American

- Estación de control: *Clementine*
- Condiciones iniciales (calentamiento)
- P. calibración : 01/10/1992-30/09/1994
- Eficiencias
 - NSE= 0.85-0.89
 - RMSE= 9.39-11.01 m³s⁻¹
 - Error en vol.=0.72-2.92 %

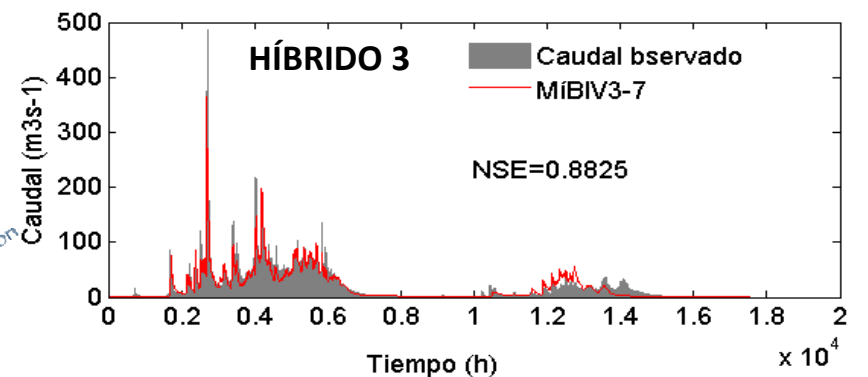
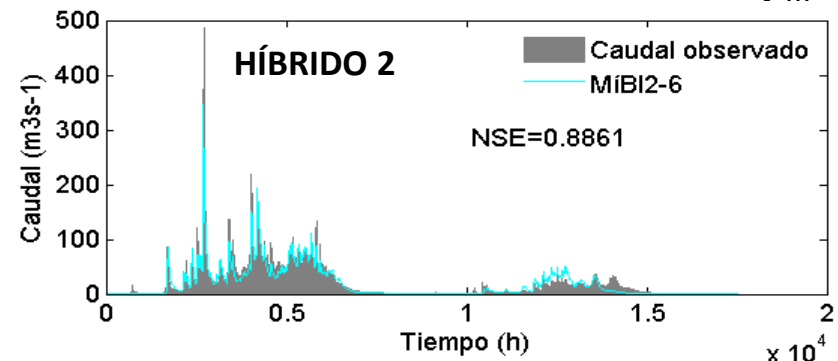
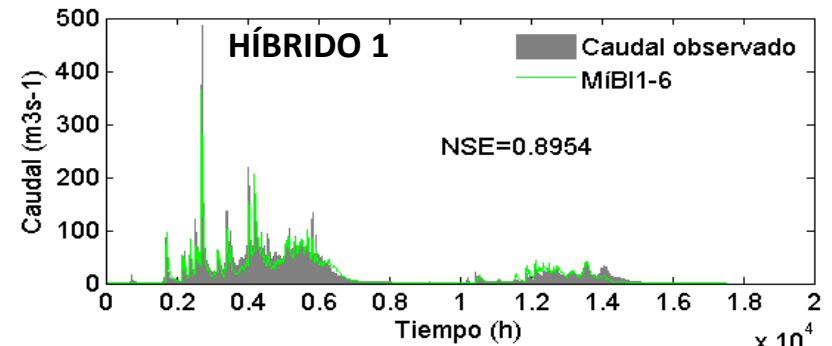
Modelo Homogéneo



Verificaciones

- Parámetros modelo TETIS
- Parámetros M. de fusión
- Balance hidrológico

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental





MODELACIÓN DE LOS CAUDALES EN SIERRA NEVADA



Validación en Carson

Temporal (*Gardnerville*)

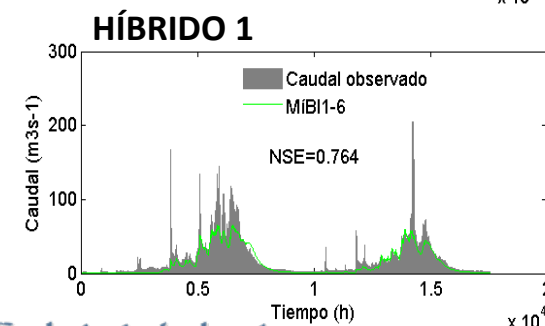
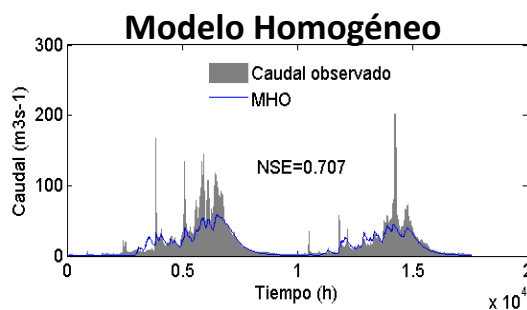
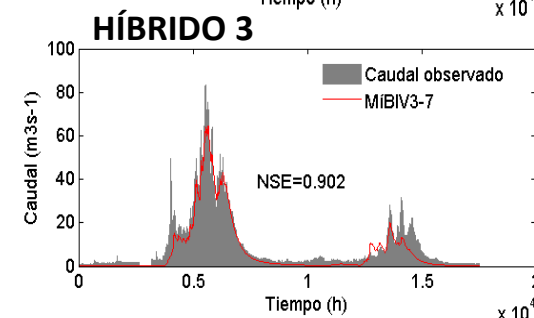
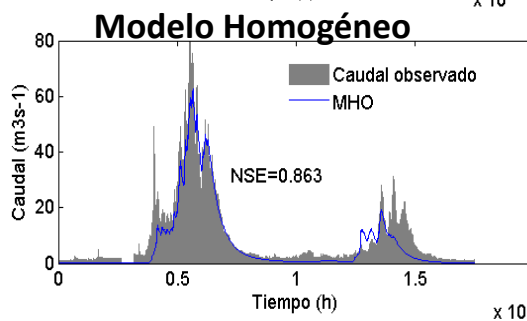
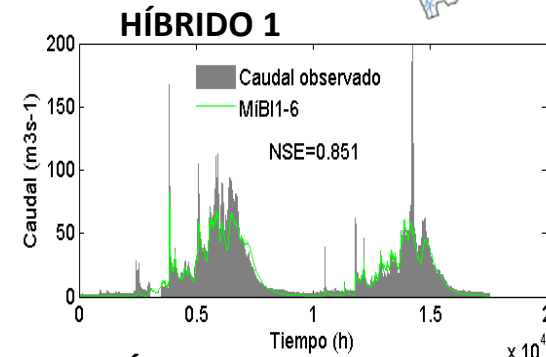
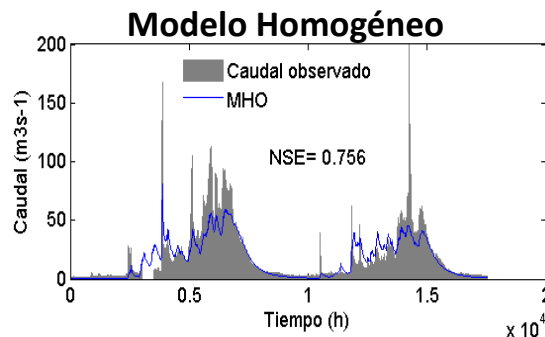
- Periodo: oct/1994-sep/2002
- NSE=0.66-0.80
- RMSE= 4.7-13.2 m³s⁻¹
- 01/10/1994-30/09/1996)
- Híbrido 1, Híbrido 2 y 3

Espacial (*Marklleeville*)

- Periodo: 10/1992-09/1994
- NSE=0.86-0.9
- RMSE= 3.9-4.52 m³s⁻¹
- Híbrido 3, Híbrido 1 y 2

Espacio-temporal (*Marklleeville*)

- Periodo: 10/1994-09/2002
- NSE= 0.6-0.75
- RMSE= 4.4-15.3m³s⁻¹
- 01/10/1994-30/09/1996)
- Híbrido 1, Híbrido 2 y 3



GIMHA



MODELACIÓN DE LOS CAUDALES EN SIERRA NEVADA

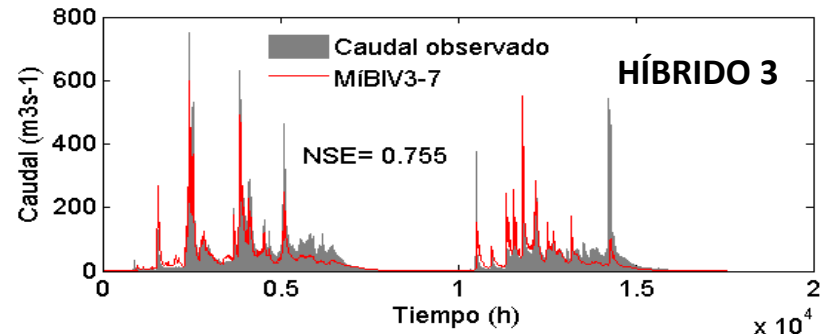
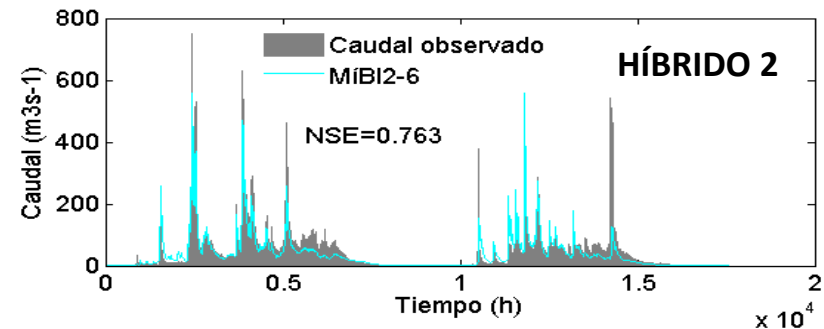
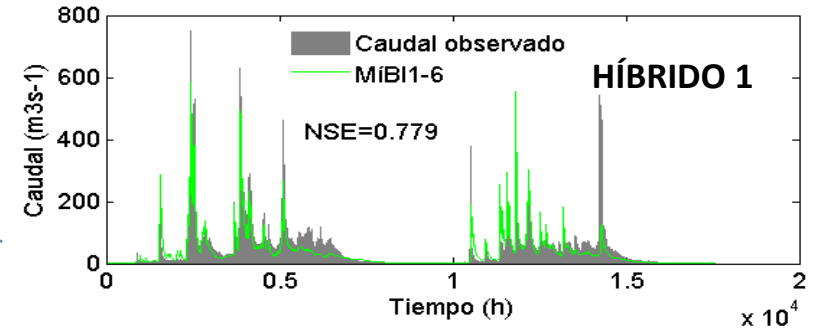
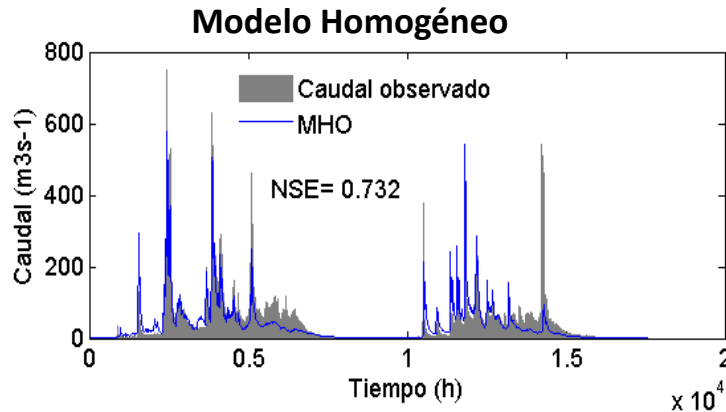


Validación en American

Temporal (Clementine)

- Periodo: 10/1994-09/2000
- NSE= 0.70-0.79
- RMSE= 13-45 m³s⁻¹
- 01/10/1994-30/09/1996
- Híbrido 1, Híbrido 2 y 3

GIMHA
 Grupo de Investigación de Modelación
 Hidrológica y Ambiental





MODELACIÓN DE LOS CAUDALES EN SIERRA NEVADA



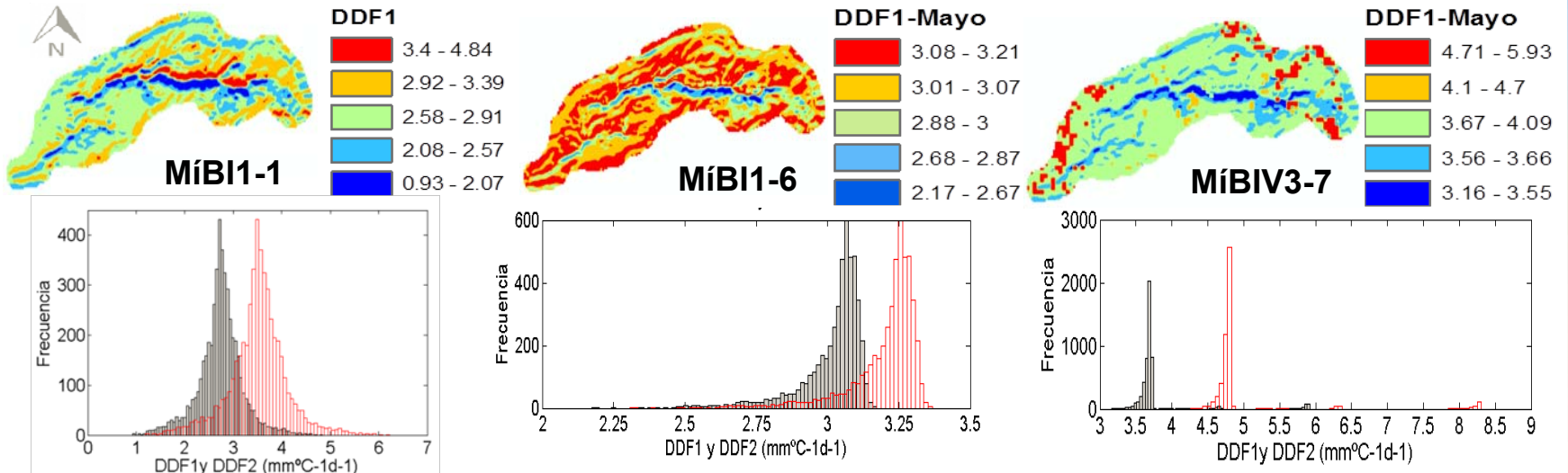
☐ Análisis de la variabilidad de los factores de fusión

- Nieve: 1 - 11.6 mm °C⁻¹ d⁻¹
- Subcuenca del río Carson

Factor DDF	MHO	MíBI1-1	MíBI1-6	MíBI2-6	MíBIV3-2	MíBIV3-7
DDF1 sin lluvia (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	3.39	1.2-3.7	0.34-3.9	1.6 - 3.1	2.6-6.4	2.2-5.9
DDF2 con lluvia (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	3.17	1.3-4.0	0.7-7.3	4.9- 8.4	3.4-8	3.4-8.5

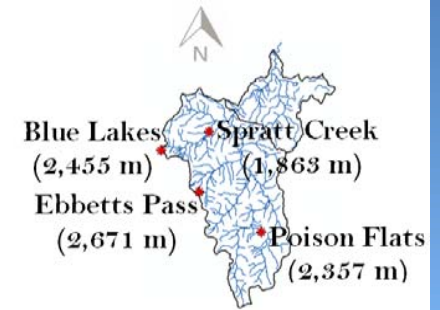
- Subcuenca del río American

Factor DDF	MHO	MíBI1-1	MíBI1-6	MíBI2-6	MíBIV3-2	MíBIV3-7
DDF1 sin lluvia (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	3.51	0.93-4.8	0.23-3.21	1.6 - 3.1	2.6-6.4	2.2-5.9
DDF2 con lluvia (mm °C ⁻¹ d ⁻¹)	7.96	1.19-6.2	0.24-3.4	4.9- 8.4	3.4-8	3.4-8.5





MODELACIÓN DE LA NIEVE EN SIERRA NEVADA



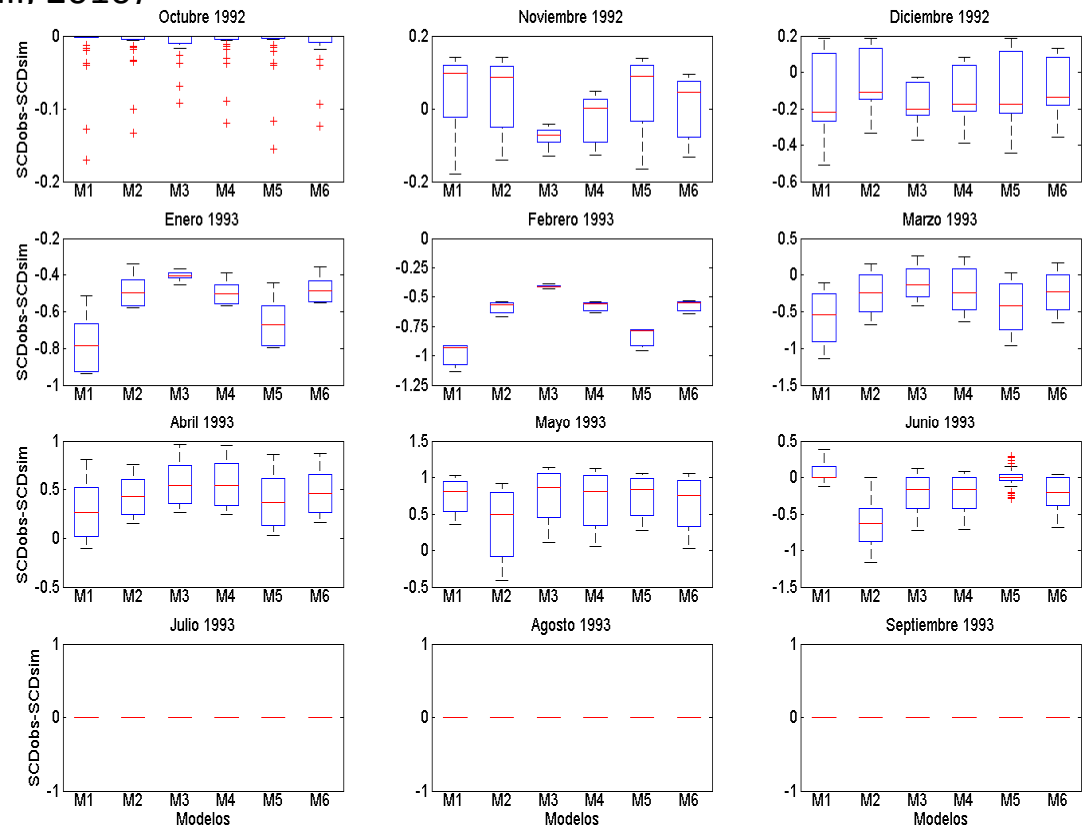
Validación puntual de la acumulación de nieve

- SWE (Estaciones SNOTEL)
- Periodo: 01/10/1992-30/09/1994
- SWE *centroid date* (Kapnick y Hall, 2010)

$$SCD = \frac{\sum t_i \times SWE_i}{\sum SWE_i}$$

Subcuenca del río Carson

- Eficiencias
 - PB= >50% (Spratt Creek)
 - PB=-5% a 21% estaciones por encima de los 2000 m
 - Shamir y Georgakakos (2006)
- E. SNOTEL Ebbetts Pass
 - El mejor modelo
 - MÍBI1-6



(M1:MHO, M2:MÍBI1-1, M3:MÍBI1-6, M4:MÍBI2-6, M5:MÍBIV3-2, M6:MÍBV3-7)



MODELACIÓN DE LA NIEVE EN SIERRA NEVADA

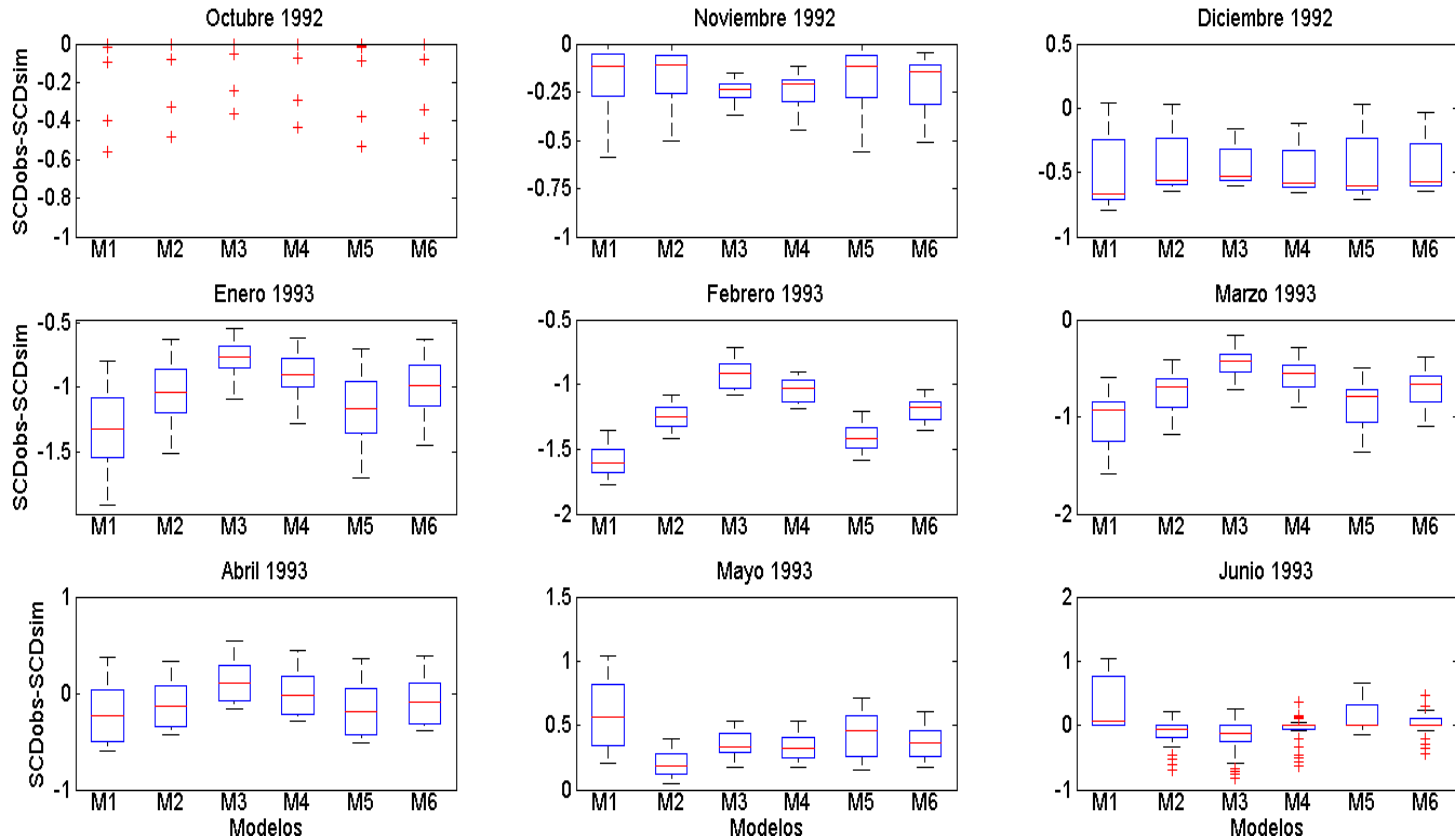
GIMHA

Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental



Subcuenca del río American

E. SNOTEL Huysink



(M1:MHO, M2:MÍBI1-1, M3:MÍBI1-6, M4:MÍBI2-6, M5:MÍBIV3-2, M6:MÍBV3-7)

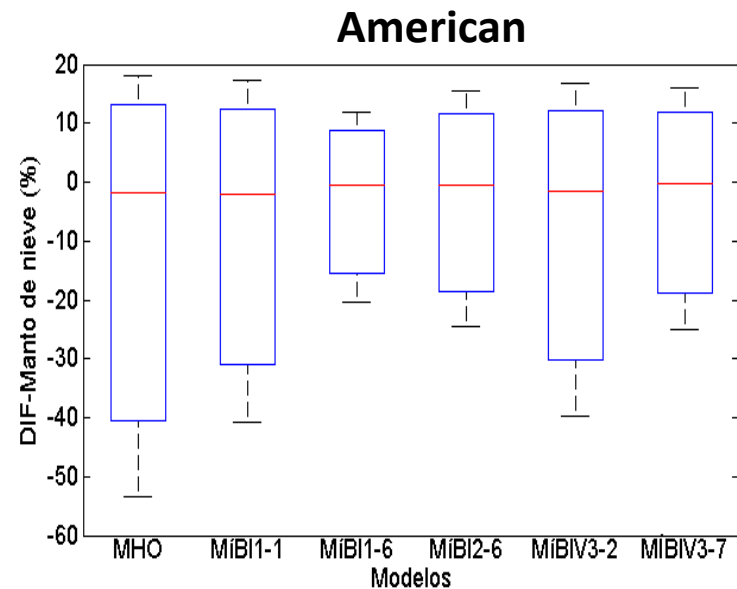
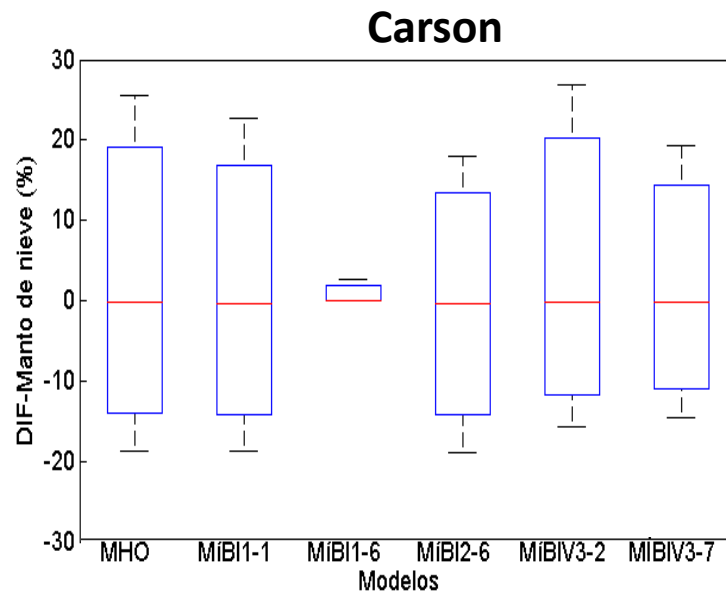


MODELACIÓN DE LA NIEVE EN SIERRA NEVADA

Validación espacial del manto de nieve

- 202 imágenes de satélite (254 disponibles)
- Periodo: 02/01/1993 al 10/06/1997
- Diferencias entre las áreas del manto de nieve (%)

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



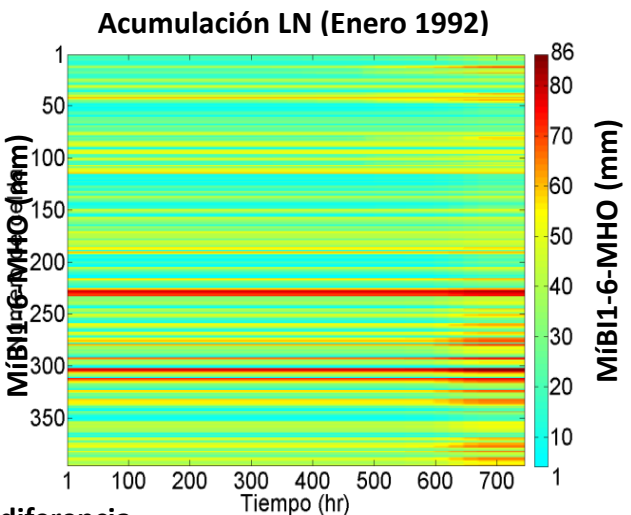
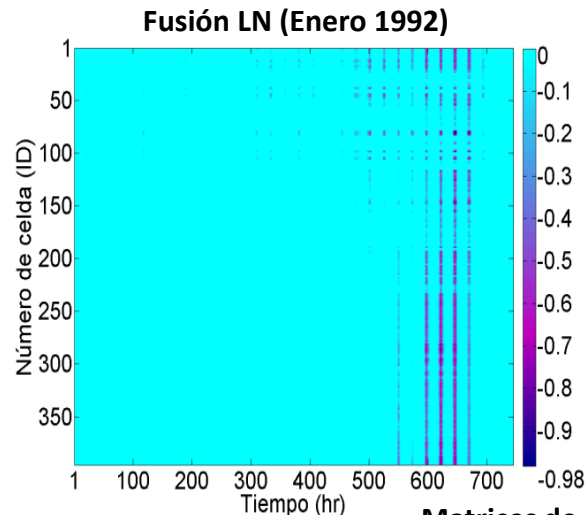
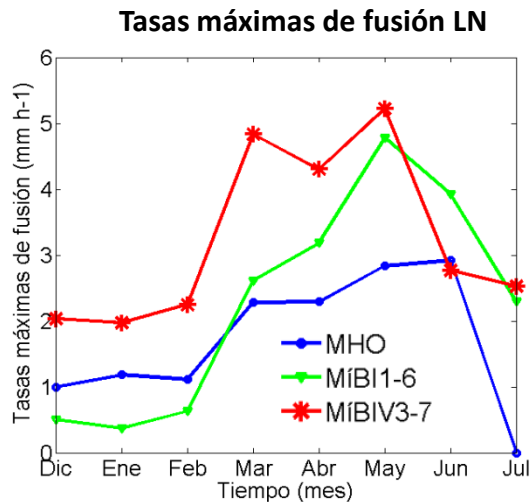


MODELACIÓN DE LA NIEVE EN SIERRA NEVADA

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental

❑ Acumulación y fusión de nieve en celdas de ladera

- Selección de un conjunto de celdas (LS y LN)
- Modelos a comparar
 - MHO, MÍBI1-6 y MÍBIV3-7
- Tasas de fusión (Carson)
 - MHOvsMÍBI1-6
 - LN: 28 mm mes⁻¹ (<2,000 m)
 - 19 mm mes⁻¹ (>2,000 m)
- Acumulación de nieve (Carson)
 - LS: MÍBI1-6 (+9%) que el MHO
 - LN: MÍBI1-6 (+16%) que el MHO
 - Menores diferencias (MÍBIV3-7 y MHO)
 - Resultados similares en American





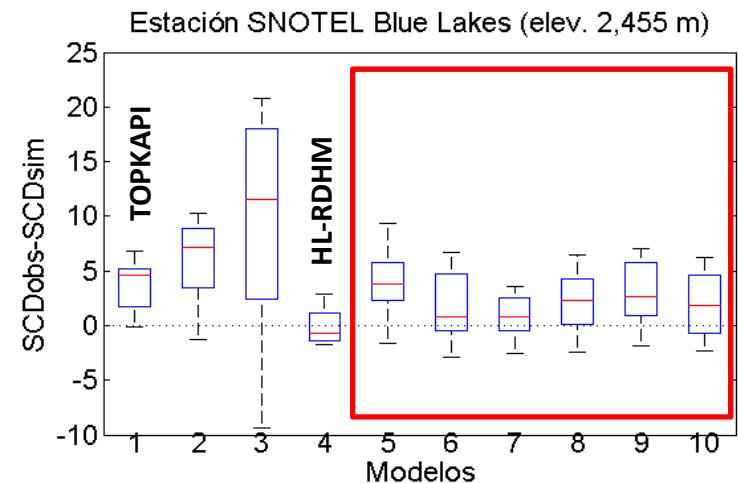
COMPARACIÓN CON MODELOS DEL PROYECTO DMIP2

Modelación de caudales

- Periodo: 01/10/1992-30/09/2000
- Eficiencias
 - NSE: 0.75-0.91
 - RMSE: 4.85-28 m³s⁻¹
 - PB: -19 a 10%

Modelos	Institución	Subcuenca del río Carson Estación Gardnerville		
		NSE	RMSE (m ³ s ⁻¹)	PB (%)
HL-RDHM	NWS	0.91	4.85	5.53
NWSRFS		0.88	5.68	-3.47
TOPKAPI	UB	0.81	7.01	10.02
GR4J	CEMAGREF	0.80	6.57	1.12
TETIS-MHO	UPV	0.77	7.70	-12.92
MíBI1-1		0.75	8.04	-14.54
MíBI1-6		0.82	6.75	-11.87
MíBI2-6		0.79	7.21	-19.67
MíBIV3-2		0.75	8.09	-18.98
MíBIV3-7		0.78	7.46	-11.72

Modelación de la nieve en las estaciones SNOTEL



(1:TOPKAPI, 2:MUCI, 3:GR4J, 4:HL-RDHM, 5:MHO
6:MíBI1-1, 7:MíBI1-6; 8:MíBI2-6, 9:MíBIV3-2 y
10:MíBIV3-7)

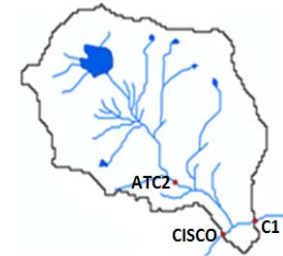
GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DE CONTRAIX

GIMHA

Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



Modelos seleccionados

- MíBI1-6
- MíBIV3-7
- Comparar con MHO

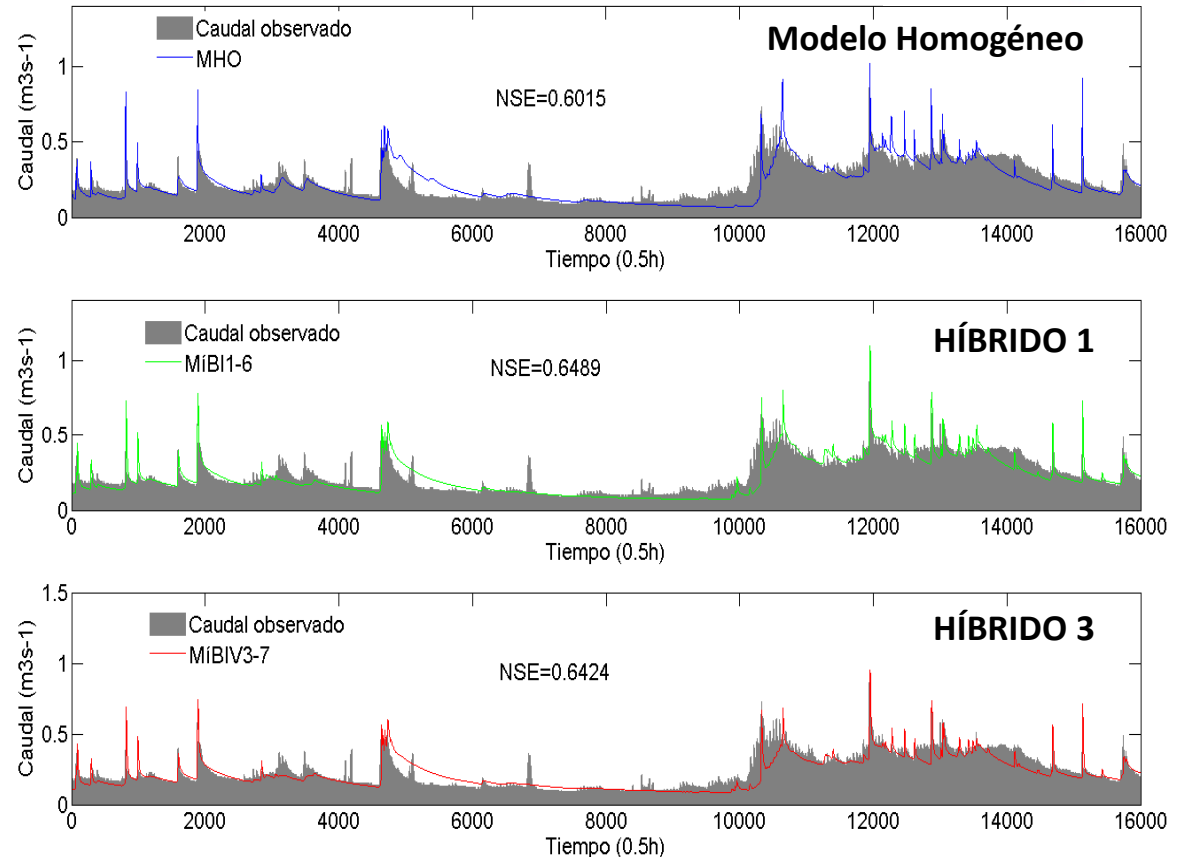
Calibración automática

- Escala temporal: 0.5 h
- Escala espacial: 30 m
- Condiciones iniciales
- E.M de Contraix
 - 01/09/2010-19/08/2011
- CISCO

Eficiencias

- NSE=0.6-0.65
- RMSE= 0.06-0.07 m³s⁻¹
- Error en vol.=2.21-3.7 %

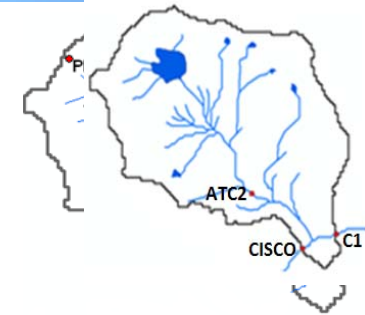
Sección de control CISCO





MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DE CONTRAIX

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



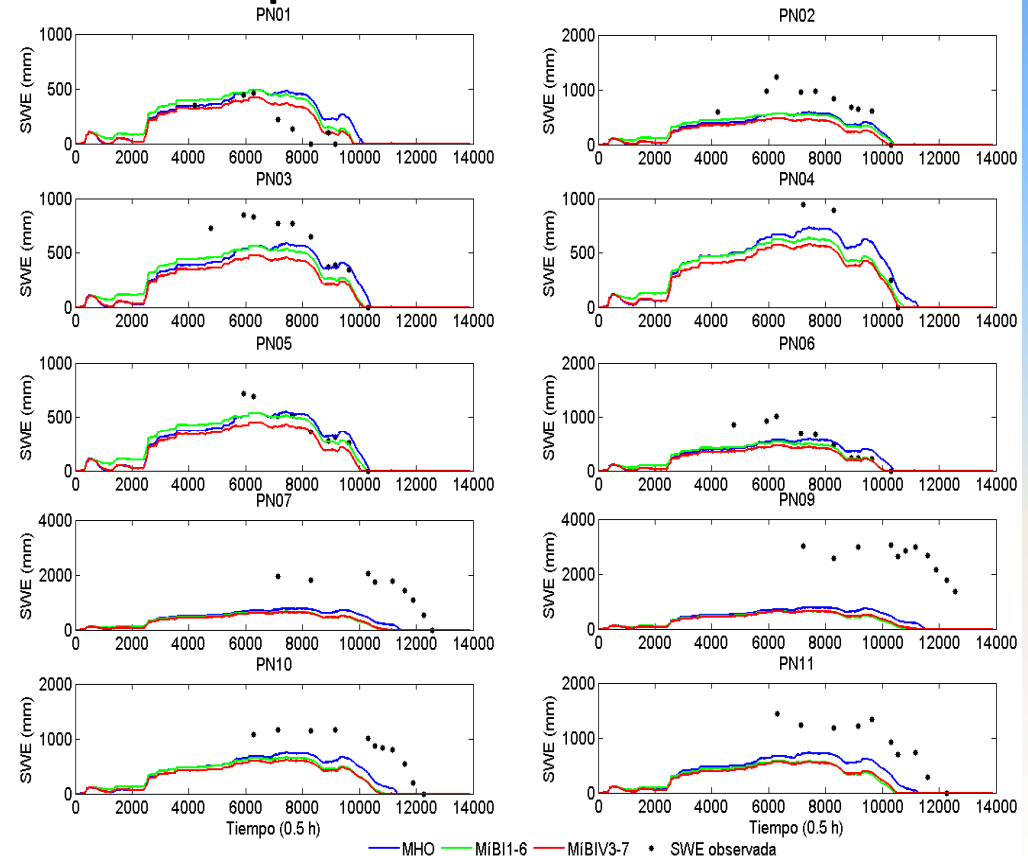
Validación temporal en caudales

- CISCO
- E. M. de Llebreta
 - Corregida por elevación (1.6)
 - 01/11/2009-16/08/2010
- Eficiencias
 - NSE=0.51-0.52
 - RMSE= 0.24 m³s⁻¹

Validación espacio-temporal en caudales

- ATC2
- E. Llebreta
 - 16/12/2009-16/08/2010
- Eficiencias
 - NSE=0.50-0.56
 - RMSE= 0.16-0.18 m³s⁻¹

Validación puntual de la acumulación de nieve





VARIABILIDAD DE LOS FACTORES DE FUSIÓN

❑ Análisis de la variabilidad de los factores de fusión

➤ Nieve: 1 - 11.6 mm °C⁻¹ d⁻¹

➤ Modelo MHO

- DDF1=3.57 mm °C⁻¹ d⁻¹
- DDF2=4.18 mm °C⁻¹ d⁻¹

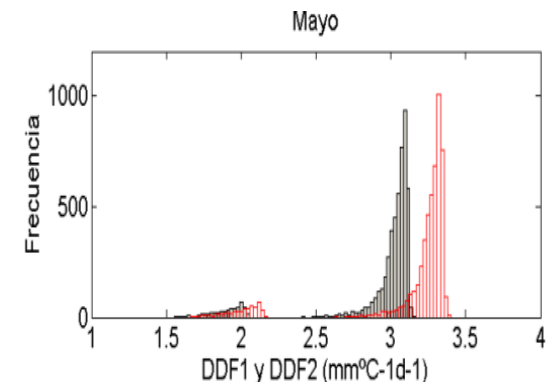
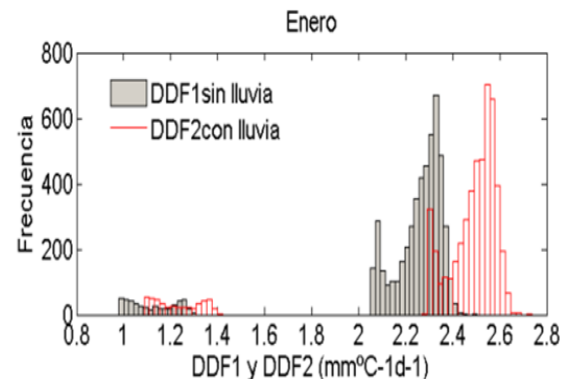
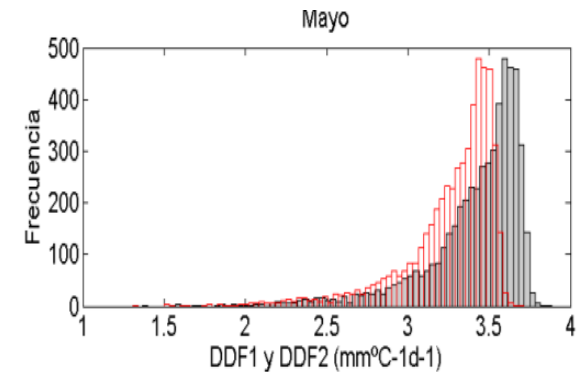
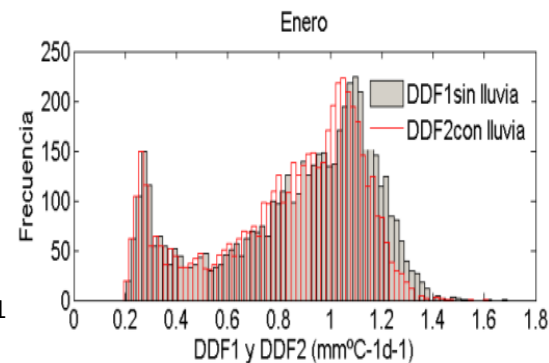
❑ Modelo MÍB1-6

- DDF1= 0.2-3.88 mm °C⁻¹ d⁻¹
- DDF2= 0.19-3.71 mm °C⁻¹ d⁻¹

❑ Modelo MÍBV3-7

- DDF1= 0.98-3.17 mm °C⁻¹ d⁻¹
- DDF2= 1.09-3.4 mm °C⁻¹ d⁻¹

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental

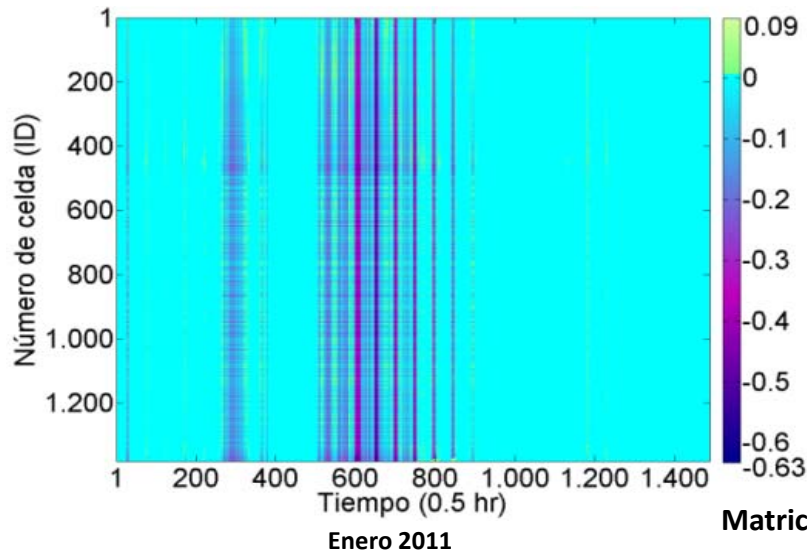
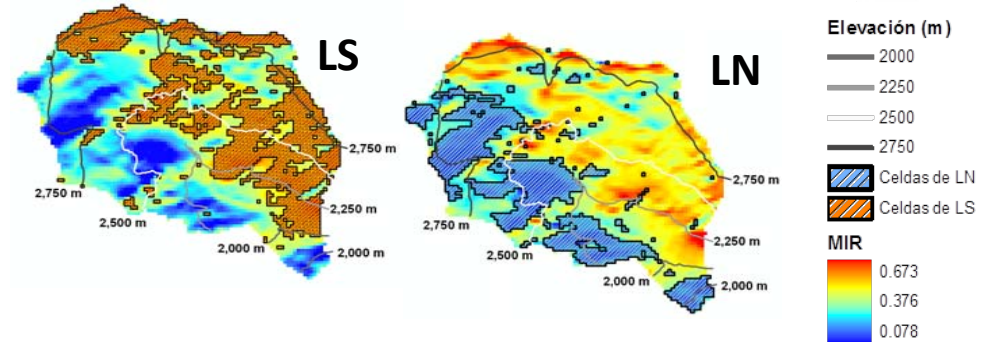




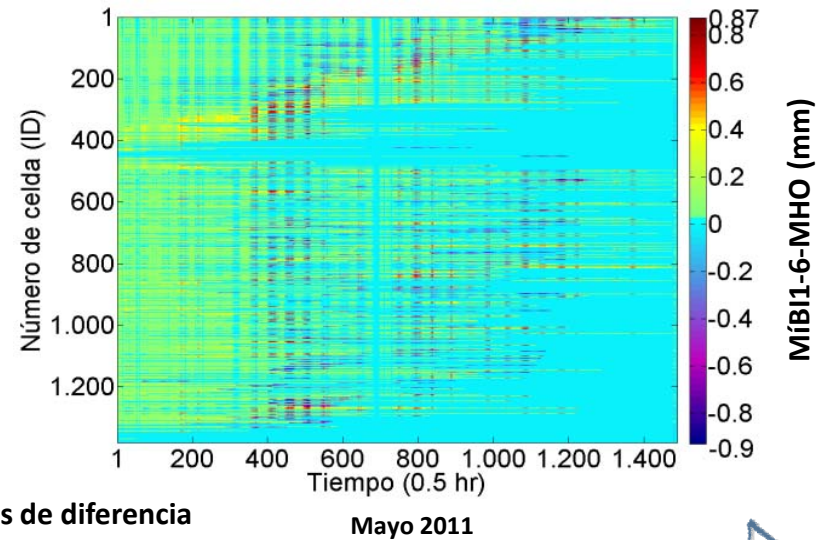
MODELACIÓN DE LA NIEVE EN CELDAS DE LADERA

❑ Acumulación y fusión de nieve

- Selección de celdas (LN y LS)
- 01/09/2010-19/08/2011
- Fusión en celdas de LN



Matrices de diferencia



➤ Acumulación en celdas de LN

- MÍBI1-6 vs MHO: diferencias máximas de 400 mm (Mayo)
- MÍBIV3-7vsMHO: diferencias máximas de 249 mm (abril)

GIMHA
 Grupo de Investigación de Modelación
 Hidrológica y Ambiental



CONTENIDO

- INTRODUCCIÓN
- METODOLOGÍA
- CASOS DE ESTUDIO
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES**

GIMHA
Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



- Los mapas MIR han demostrado ser un procedimiento válido, consiguiendo introducir de mejor manera tanto la variabilidad de los flujos de energía, como los efectos topográficos cuando se emplean seis mapas MIR. Esto se ve reflejado en los buenos resultados de los modelos híbridos propuestos en este trabajo.
- El mapa MDDF, cuya variabilidad está condicionada por la ocupación de suelo y los factores DDF, puede ser mejorado utilizando mapas con mayor precisión y tomando en cuenta la densidad de la vegetación. Sin embargo, al introducir el mapa MDDF se han conseguido resultados superiores a los del MHO.
- La variabilidad de los factores DDF, conseguida en los tres casos de estudio, indica que se está modelando con parámetros acordes a los encontrados en la literatura con valores de 1 a $11.6 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$.
- Los resultados en la calibración y validación de los caudales de las subcuencas de Sierra Nevada EE. UU., son eficiencias similares a las conseguidas en el DMIP2 (Smith et al., 2013). En la cuenca de Contraix son resultados aceptables, pero es difícil establecer con precisión qué modelo obtiene los mejores resultados, ya que no se dispone de información suficiente.



- En relación con la modelación de la acumulación de la nieve, los mejores resultados se obtienen en las estaciones ubicadas a mayor elevación, mientras que los resultados con mayor incertidumbre en las estaciones más bajas. Esto coincide con lo reportado por Shamir y Georgakakos (2006) y Smith et al. (2013) para las cuencas de Sierra Nevada, EE. UU. En la cuenca de Contraix los modelos híbridos mostraron mejoras en la modelación de la acumulación respecto al MHO.
- En la modelación de caudales de cuencas pequeñas y medianas, la inclusión de la variabilidad de los factores DDF no influye significativamente en los resultados obtenidos en la desembocadura. También, se ha observado que las eficiencias de los modelos son similares incluso con diferente variabilidad de los factores DDF. Sin embargo, los modelos propuestos presentaron mejoras respecto del MHO.
- Al introducir la variabilidad de los factores DDF en los modelos híbridos, se mejora significativamente la modelación de la distribución espacial de la nieve. Este resultado es de gran relevancia, ya que en los trabajos encontrados en la literatura no reportan un análisis de este tipo y sólo se enfocan en la validación de los caudales y de la acumulación puntual de la nieve.

GIMHA

Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- ❑ El modelo híbrido de fusión MÍBI1-6 es una solución parsimoniosa que ha demostrado obtener muy buenos resultados. Por ello, se propone probar este modelo en otras cuencas pequeñas y grandes, tanto de España como de otras regiones. Lo anterior con el fin de que este modelo pueda ser implementado en cuencas de cualquier tamaño.
- ❑ Se plantea modificar la conceptualización del modelo MÍBIV3-7 que considera la cubierta vegetal. Esta modificación consistiría en una formulación que cuantifique de manera indirecta la energía de onda larga, considerando el tipo de vegetación, la densidad de la vegetación y la interceptación de la nieve. Con esto, se mejorarían los resultados ya conseguidos con este modelo.
- ❑ Se propone verificar el efecto de la condición de cielo nublado en los resultados conseguidos con la conceptualización del modelo MÍBI1-6. Para así, determinar las ventajas o desventajas de considerarla en la modelación hidrológica de cuencas de alta montaña.

DIFUSIÓN CIENTÍFICA

❑ REVISTAS

- Smith, M.; Koren, V.; Zhang, Z.; Moreda, F.; Cui, Z.; Cosgrove, B.; Mizukami, N.; Kitzmiller, D.; Ding, F.; Reed, S.; Anderson, E.; Schaake, J.; Zhang, Y.; Andréassian, V.; Perrin, C.; Coron, L.; Valery, A.; Khakbaz, B.; Sorooshian, S.; Behrangi, A.; Imam, B.; Hsu, K.-L.; Todini, E.; Coccia, G.; Mazzetti, C.; Andres, E.O.; Francés, F.; Orozco, I.; Hartman, R.; Henkel, A.; Fickenscher, P.; Staggs, S.; 2013. The Distributed Model Intercomparison Project - Phase 2: Experiment Design and Summary Results of the Western Basin Experiments. *Journal of Hydrology*.
- Orozco, I.; Francés, F.; 2014. Parsimonious modeling spatially distributed processes of accumulation and snowmelt. In preparation.

❑ LIBROS

- Camarero, L., Butturini, A., Catalan, J., Francés, F., Boix, M., Orozco, I., Sala, M., 2012. Biogeoquímica de las aguas de montaña: Control hidrológico y efectos potenciales del cambio climático. Proyectos de investigación en parques nacionales 2008-2011.

❑ CONGRESOS

- Orozco, I., Camarero, L., Butturini, A., Francés, F., 2013. Variabilidad espacial y temporal de los factores grado-día de fusión de nieve en una cuenca mediterránea. *III Jornadas de Ingeniería del Agua*. Valencia, España.
- Orozco, I.; Francés, F.; López, J.; Barrios, M. I.; 2010. Modelación hidrológica distribuida en cuencas de alta montaña utilizando el modelo TETIS. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 3A-402, Punta del Este, Uruguay.
- Francés, F.; Orozco, I.; 2010. Automatic Calibration of a Distributed Rainfall-Runoff Model, Using the Degree-Day Formulation for Snow Melting, Within DMIP2 Project. *American Geophysical Union*, H23A-1173. San Francisco, EE. UU.
- Orozco, I.; Francés, F.; 2010. Assessing the snowmelt submodel of TETIS within the DMIP2 project. *European Geosciences Union General Assembly*, EGU2010-13077. Viena, Austria.
- Orozco, I.; Francés, F.; 2014. Efecto de la Variabilidad de los Factores de Fusión en la Modelación Hidrológica de Cuencas de Alta Montaña. *XXVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Santiago de Chile (Enviado).

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT).

A Parques Nacionales de España, Proyecto I+D “ACOPLA” (OAPN 011/2008).

Al Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València.

Al Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València.

Gracias por su atención



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Instituto de Ingeniería del
Agua y Medio Ambiente

GIMHA

Grupo de Investigación de Modelación
Hidrológica y Ambiental



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Doctorado en
Ingeniería del Agua y
Medioambiental

TESIS DOCTORAL

MODELACIÓN PARSIMONIOSA Y ESPACIALMENTE DISTRIBUIDA DE LOS PROCESOS DE ACUMULACIÓN Y FUSIÓN DE NIEVE

Autor

Ismael Orozco Medina

Director

Dr. Félix Francés García

