

1. Introducción

El éxito en la modelación hidrológica de cuencas de alta montaña depende en gran medida de la cuantificación que se haga de los procesos de acumulación y fusión de nieve, modelar correctamente estos procesos tiene implicaciones en la evaluación de recursos hídricos, producción hidroeléctrica, erosión e inundaciones. Sin embargo, la modelación matemática de estos procesos es compleja por el almacenamiento temporal y la liberación del agua en varias escalas temporales, con una alta variabilidad espacial debida al patrón de distribución de las precipitaciones y los efectos orográficos (Kling et al., 2006). Además de la complejidad anterior, está la falta de información que en la mayoría de los casos no se cuenta con datos suficientes a la escala espacial y temporal que requieren algunos modelos matemáticos de fusión. Por lo tanto, se recurre a la cuantificación de esta información a través de métodos indirectos y ecuaciones empíricas que pueden incrementar la incertidumbre en los resultados de modelos conceptualmente más completos, como por ejemplo los modelos de balance de energía. Con base en lo anterior, desde el año 2009 se ha venido llevando a cabo la modelación de los procesos de acumulación y fusión de nieve bajo el principio de parsimonia, utilizando el modelo hidrológico TETIS y la cuenca mediterránea de Contraix.

2. Cuenca experimental Contraix

En este trabajo se propone modelar la cuenca mediterránea de Contraix, ubicada en el interior del Parque Nacional de Aigüestortes i Estany de Sant Maurici en Catalunya, España (Fig. 1). Es una cuenca experimental de alta montaña, con un área de 4.79 km², comprendida entre las altitudes de 1,967 m a 2,958 m. Su régimen hidrológico está claramente influenciado por los procesos de acumulación y fusión de nieve.



Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca mediterránea de Contraix (Long. 42.3° E y Lat. 0.55° N).

2.1. Trabajos de campo

En la implementación del modelo se han realizado varias visitas de campo, para la toma de información edafológica, ocupación de suelo, infiltraciones, nieve y secciones de cauce que se requieren para determinar los parámetros hidrodinámicos del modelo (Fig. 2).

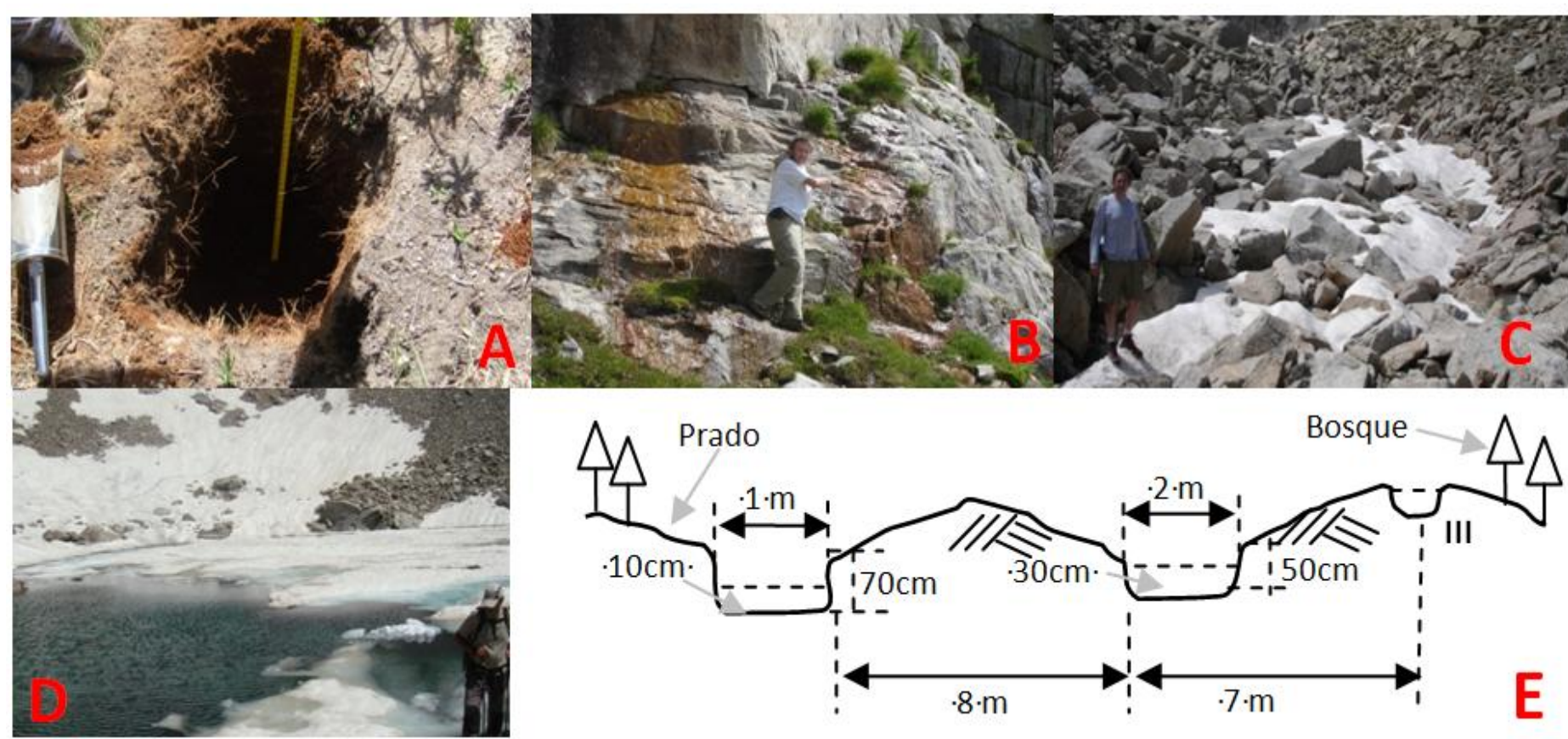


Figura 2. A) Toma de muestras de suelo, B) identificación y cuantificación de infiltraciones, C) mantos de nieve en ladera, D) cuerpos de agua y E) secciones de cauce.

2.2. Instrumentación de la cuenca

Se ha realizado la instalación de la estación meteorológica Contraix, equipada con sensores de temperatura y humedad relativa del aire, radiación global, radiación neta, velocidad y dirección del viento (Fig. 3).



Figura 3. Instalación de la estación meteorológica de Contraix (2,584 m).

Además de la instalación de la sección de aforo automática CISCO en la desembocadura de la cuenca, equipada con un registrador del nivel del agua WL15 GlobalWater (Fig. 4).



Figura 4. Ubicación de secciones de aforo CISCO (4.79 km²) y ATC2 (3.23 km²).

Por último, se colocaron 10 pértigas ubicadas a diferentes alturas para cuantificar las profundidades de la capa de nieve (Fig. 5).



Figura 5. Pértigas ubicadas a alturas comprendidas entre 2,062 m (PN01) y 2,735 m (PN09). Asimismo, toma de muestras para la cuantificación de la densidad.

3. Conceptualización del modelo TETIS

Es un modelo distribuido conceptual con parámetros físicamente basados, utiliza un esquema de seis tanques que representan el almacenamiento y movimiento del agua en ladera (manto de nieve, estático, superficial y gravitacional), cauce y acuífero (Vélez et al., 2009) (Fig. 6). El modelo puede ser descargado gratuitamente en: <http://lluvia.dihma.upv.es/>.

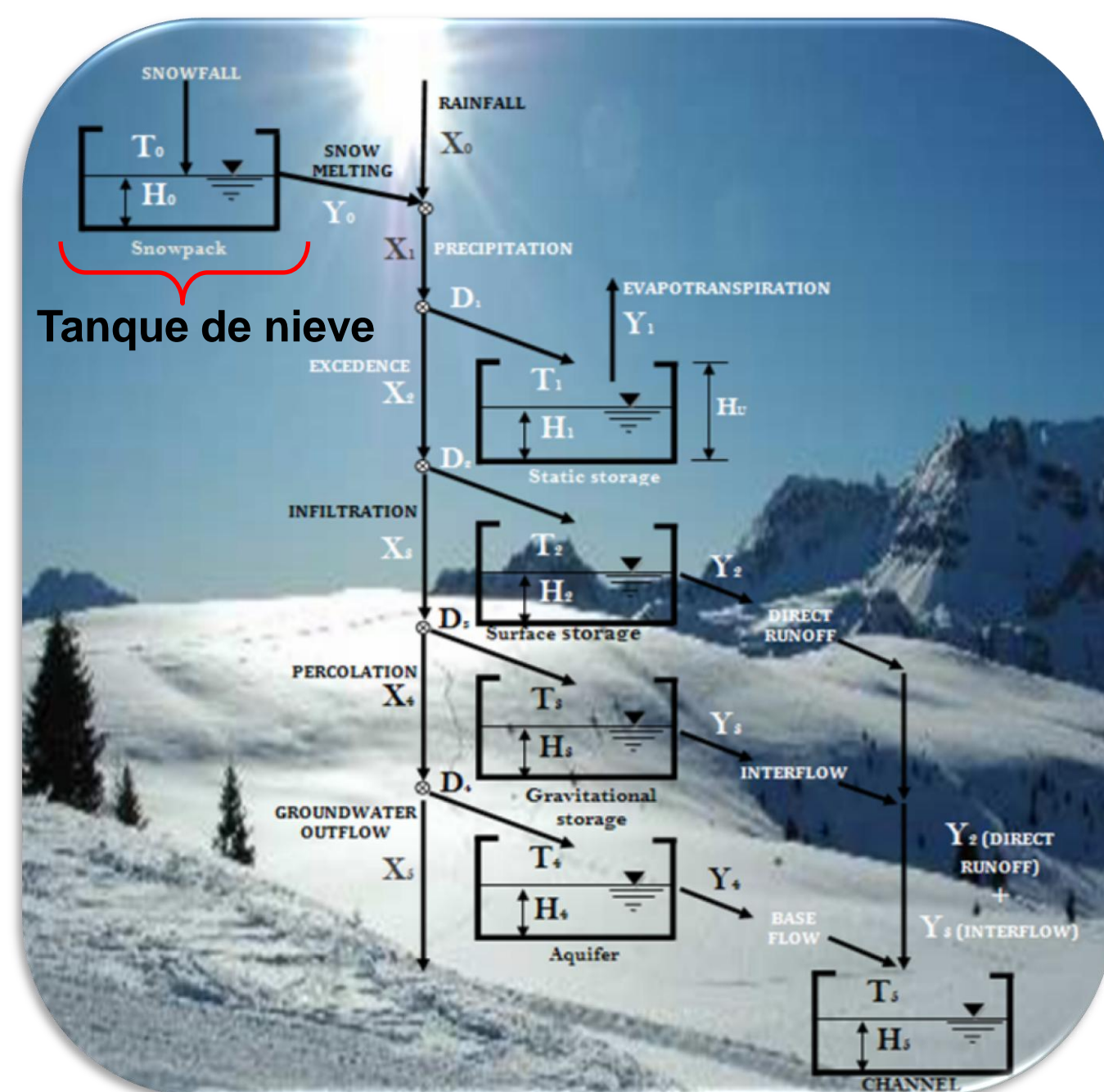


Figura 6. Esquema conceptual del movimiento vertical a nivel de celda del modelo.

3.1. Modelo de fusión

El modelo TETIS utiliza para la fusión el método grado-día (Ec. 1), que es un enfoque empírico que asume una relación lineal entre la temperatura del aire (T_a) y la fusión de la nieve (M). En el caso de la temperatura base o umbral (T_b), se usa generalmente el valor de 0°C, pero puede variar entre 4°C y -2°C. Por último, DDF_{1,2} son los factores de fusión sin lluvia y con lluvia.

$$M = \begin{cases} DDF_{1,2}(T_a - T_b); & \text{Si } T_a \geq T_b \\ 0; & \text{Si } T_a < T_b \end{cases} \quad (1)$$

3.2. Implementación del modelo

Los inputs de precipitación, temperatura y caudales son incorporados al modelo a una escala temporal de 30 minutos. El modelo utiliza tres mapas de parámetros: almacenamiento capilar del suelo (H_u), capacidad de infiltración (K_s) y capacidad de percolación (K_p). En su cálculo se ha empleado el DEM, los mapas derivados del DEM, la ocupación del suelo, la edafología, la litología y el Soil Water Characteristics (SWC) (Fig. 7). Al parámetro K_p , se le asigna una conductividad de 0.01 cmh⁻¹.

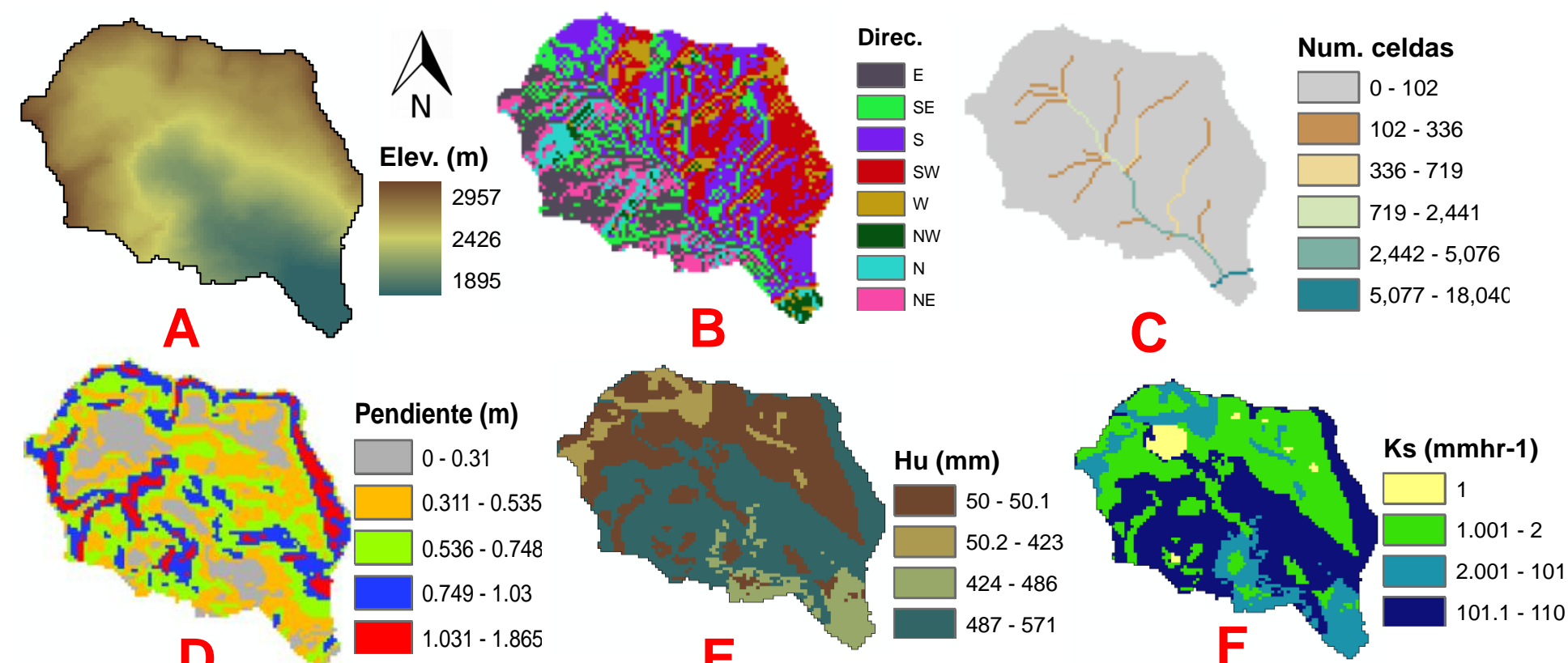


Figura 7. A) DEM, B) direcciones flujo, C) celdas acumuladas, D) pendientes, E) almacenamiento capilar (H_u) y F) capacidad de infiltración (K_s).

4. Metodología

La metodología que se plantea en el siguiente trabajo, incluye el uso del modelo hidrológico distribuido TETIS y su modelo de fusión que utiliza el método grado-día, introduciendo la variabilidad espacial y temporal de los factores DDF tomando como referencia los trabajos desarrollados por Cazorzi y Dalla Fontana (1996), Hock (1999) y Kling et al. (2006). Para lo anterior, se propone emplear seis mapas de índices de radiación global de onda corta mensual a nivel de celda a cielo despejado (MIR) y un mapa de aportes de energía de onda larga de la vegetación (MDDF).

5. Resultados

El cálculo de la radiación global se realizó usando las herramientas de análisis de radiación de la plataforma ArcGIS (Fig. 8).

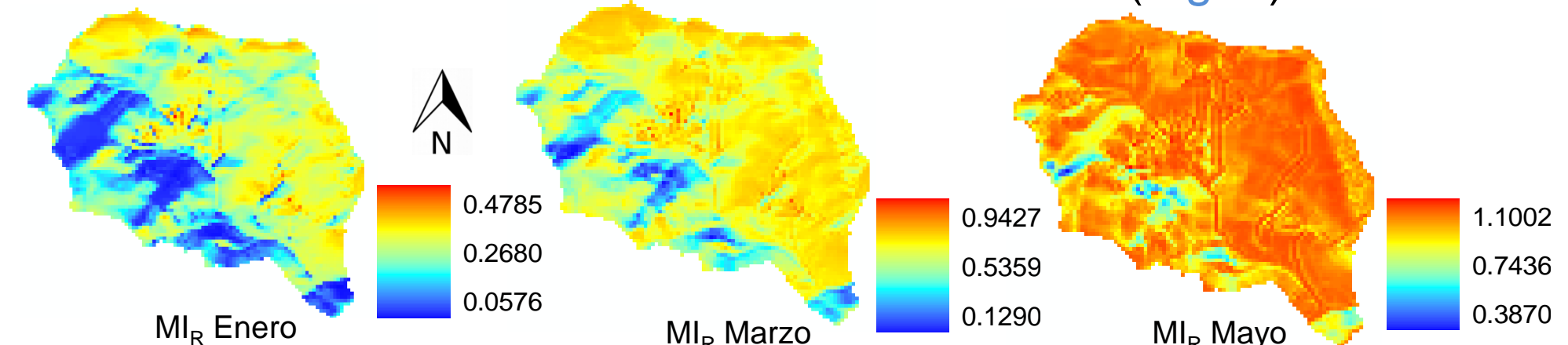


Figura 8. Tres ejemplos de los seis mapas de índices de radiación global calculados.

En la tabla siguiente se muestran los factores de fusión medios usados para construir el mapa MDDF, se asignaron en función del tipo de cubierta vegetal.

Cubierta vegetal	DDF (mm°C ⁻¹ d ⁻¹)	DDF medios (mm°C ⁻¹ d ⁻¹)
Sin cubierta vegetal	2.82-7.5	5.16
Bosque caducifolio	2.7-4.5	3.6
Bosque de coníferas	1.4-3.36	2.38

5.1. Resultados en calibración

En la tabla se muestran los estadísticos obtenidos con calibración automática usando el algoritmo SCE-UA, para el período 01/09/2010-19/08/2011. En la figura 9 se puede observar la simulación de los caudales observados y la modelación de la fusión de nieve.

Estadísticos	Experimento 1 (DDF _{1,2} *homogéneos)	Experimento 2 (DDF _{1,2} *MIR)	Experimento 3 (DDF _{1,2} =FC _{1,2} *MDDF+FC ₂ *MIR)
Caudal máximo observado (m ³ s ⁻¹)	0.950		
Caudal máximo simulado (m ³ s ⁻¹)	1.017	1.094	0.949
NSE	0.602	0.649	0.642
RMSE (%)	0.072	0.068	0.068
Volumen observado (Hm ³)	7.086		
Volumen simulado (Hm ³)	6.824	6.929	6.878
Error en el volumen (%)	3.701	2.216	2.938

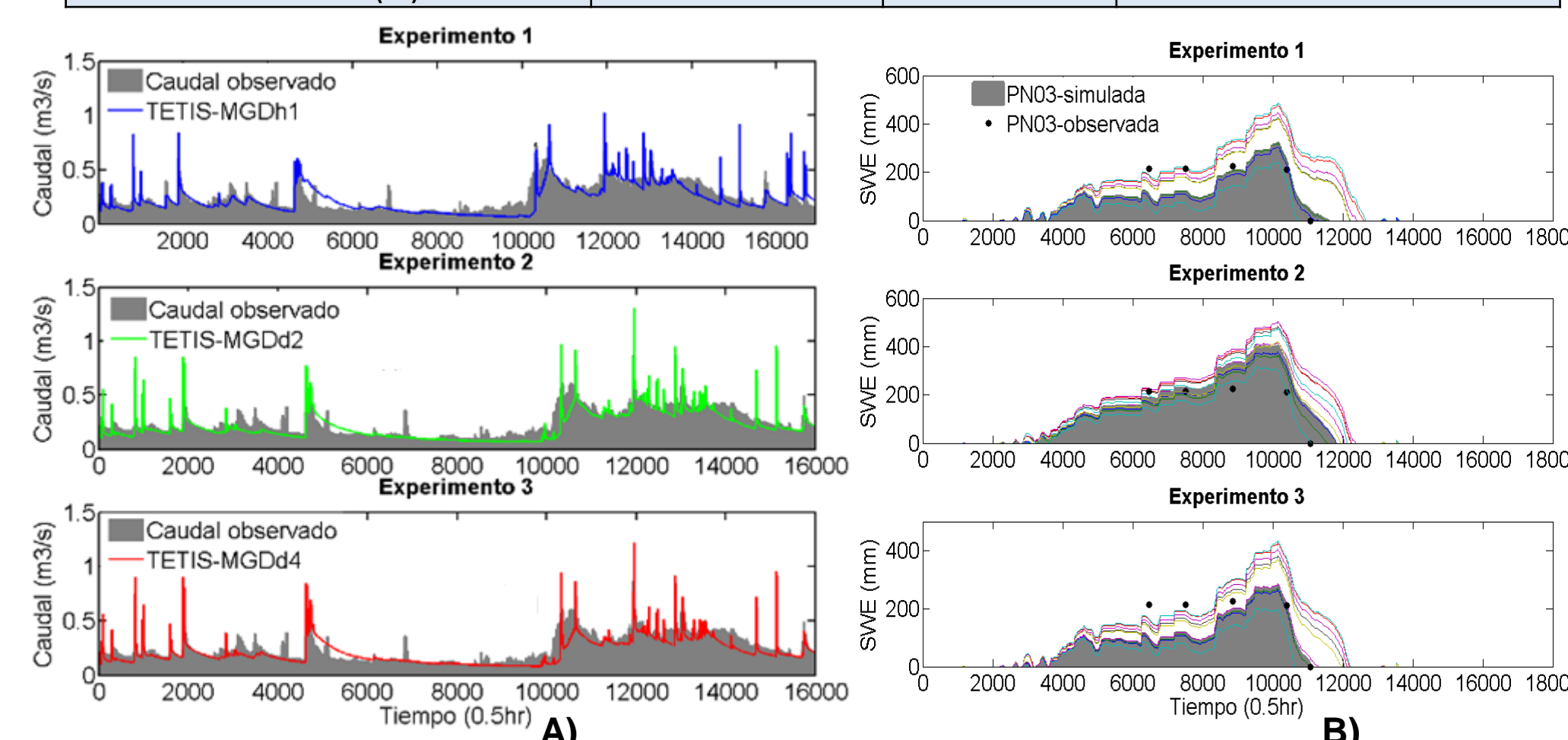


Figura 9. A) Resultados en la modelación de los caudales observados (CISCO) y B) alturas equivalentes de agua (Pértigas).

5.2. Resultados en validación

La validación temporal del modelo, se ha llevada a cabo para el período comprendido del 01/11/2009 a 16/08/2010 y la validación espacio-temporal en el período comprendido del 16/12/2009 a 16/08/2010. En validación temporal se han obtenido NSE superiores a 0.5 y RMSE alrededor de 0.2% (Fig. 10a). En la validación espacial en la sección ATC2, se han obtenido NSE del orden de 0.5 y RMSE de 0.15%. Por último, en la validación espacio-temporal (AT2), se han obtenido NSE entre 0.5-0.56 y RMSE entre 0.16%-0.18% (Fig. 10b).

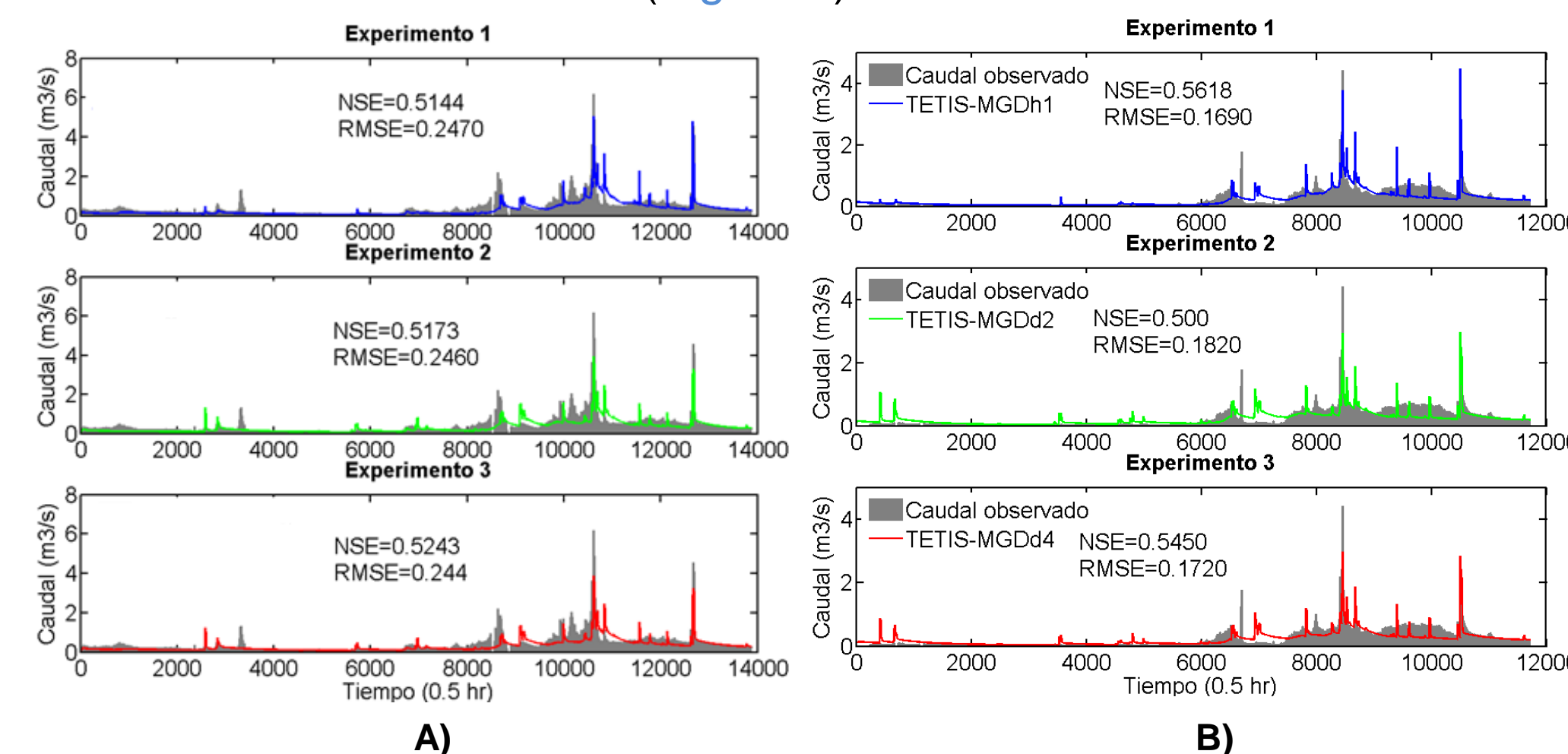


Figura 10. A) Validación temporal de caudales en la sección CISCO y B) validación espacio-temporal en la sección ATC2.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en calibración y validación con los experimentos 1, 2 y 3, a la escala espacio-temporal empleada y las simulaciones realizadas, muestran que la variabilidad de los factores de fusión propuesta tiene poca influencia en la simulación de los caudales observados en la desembocadura de la cuenca experimental de Contraix.

Los resultados en la modelación de los procesos de acumulación y fusión de nieve, muestran una más clara influencia de la variabilidad de los factores de fusión. Asimismo, el experimento 2 consigue una mejor simulación de las SWE en los meses de invierno a nivel de celda y de ladera con tasas de fusión más razonables a los datos observados.

Referencias

Kling, H., Fürst, J., Nachtnebel, H.P., 2006. Seasonal, spatially distributed modelling of accumulation and melting of snow for computing runoff in a long-term, large-basin water balance model. *Hydrological Processes*, 20, 2141-2156.
Vélez, J.J., Puricelli, M., López, F., Francés, F., 2009. Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13, 229-246.
Cazorzi, F., Dalla Fontana, G., 1996. Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index. *Journal of Hydrology*, 181, 169-187.
Hock, R., 1999. A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology*, 45, 101-111.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el CONACYT, Parques Nacionales (proyecto ACOPLA OAPN 011/2008), el Ministerio de Ciencia e Innovación Español (proyecto CGL2005-06219/HID) y Consolider-Ingenio (CSD2009-00065).