

Módulo nival en los modelos hidrológicos de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico. Calibración y validación en Picos de Europa

Joan Deval Castillo¹, Jesús Ángel Luengo García², José Luis Lorenzo Riera³, Javier García Hernández⁴, Miriam de Paz García⁵

^{1,3,5}Oficina Técnica de Estudios y Control de Obras, S.A (OFITECO), ²Confederación Hidrográfica del Cantábrico (Ministerio de Ambiente y Medio Rural y Marino), ⁴ Centro de Investigación en Medio Alpino (CREALP, Sion, Suiza)

¹jdeval@ofiteco.es, ²jaluengo@chcantabrico.es, ³jllorenzo@ofiteco.es, ⁴javier.garcia@crealp.vs.ch ⁵mdepaz@ofiteco.es

1 Introducción

Las inundaciones constituyen el riesgo natural con mayor impacto en vidas humanas y pérdidas económicas en toda Europa (RIBAMOD, 1997). El riesgo de inundación en el área Cantábrica se ve incrementado a causa de sus especiales condiciones climáticas y geomorfológicas, que favorecen la generación de lluvias intensas. Además, se puede dar la circunstancia de que, después de unas grandes nevadas, se produzca un episodio de abundante lluvia con un aumento súbito de las temperaturas, lo que provoca avenidas repentinas, como ocurrió en diciembre de 1980, cuando el río Cares destruyó el puente de Cordiñanes y causó una víctima humana. A esto hay que añadir la fuerte pendiente longitudinal de los ríos Cantábricos, que disminuye los tiempos de respuesta hidrológica.

La Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC) ha unificado la gestión de las diferentes redes hidrológicas en un único Centro de Cuenca (CECU-CHC), desde el que se controla como una única red las estaciones de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA), del Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas (SAICA) y del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), red única que se ha denominado Sistema Automático de Información (SAI-CHC). Entre los objetivos del CECU-CHC se incluyen la mejora de la gestión hidrológica y la previsión y aviso temprano de avenidas.

Durante la implantación de los modelos hidrológicos para el Sistema de Ayuda a la Decisión (SAD) del CECU-CHC, surgió la necesidad de incorporar un módulo que simulara los procesos de acumulación-fusión de la nieve, pues tales procesos son, en ocasiones, de importancia en determinadas cuencas de la CHC. Este módulo adquiere datos de precipitación y temperatura proporcionados por las estaciones automáticas de la CHC y de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet), así como de las previsiones meteorológicas disponibles (modelo HIRLAM, proporcionado por la AEMet), convirtiendo tales datos y previsiones en estimaciones de precipitación equivalente, que se ponen a disposición de los modelos hidrológicos del SAD para estimar los caudales en los distintos puntos de control de la cuenca.

Los fenómenos nivosos cobran especial relevancia en los caudales máximos primaverales de los ríos Cares y Deva. Las cabeceras de estas cuencas están situadas en el Parque Nacional de Picos de Europa, siendo por ello que se ha elegido esta zona para la calibración y validación del modelo nival.

2 Zona de Estudio y Datos de Partida

El Parque Nacional de Picos de Europa es un macizo montañoso calizo que se encuentra enclavado en la parte central de la Cordillera Cantábrica y se extiende entre Asturias, León y Cantabria. Los Picos de Europa conforman una unidad singular por su accidentado relieve, con cumbres que sobrepasan ampliamente los 2000 metros, y su proximidad al mar Cantábrico, con su punto más septentrional a escasos 20 km de la costa.

En el presente estudio el módulo nival se ha calibrado para un área de 735 km², en la cabecera del río Deva (290 km²) y de su principal afluente, el Cares (445 km²). El régimen hidrológico de estos ríos es de marcada influencia nival e importante torrencialidad. La estación de aforos está situada en el río Deva, aguas abajo de su

confluencia con el Cares, cerca de la población de Panes (Asturias). Esta estación recoge el caudal de una cuenca vertiente de 1136 km² (figura 1).

En esta alta cordillera, que se extiende paralela a la costa y a pocos kilómetros de ésta, las masas de aire húmedo, procedentes del mar Cantábrico, se ven obligadas a ascender de forma rápida, lo que induce su convección y favorece la abundancia de precipitaciones. La presencia de nieve es permanente en algunos puntos de Picos de Europa y se acentúa en invierno a partir del mes de diciembre.

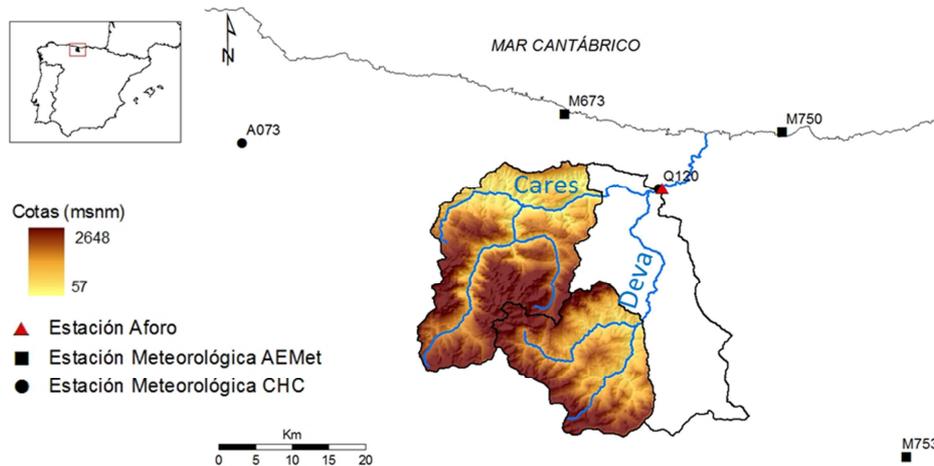


Figura 1 Localización de la cuenca de estudio con la red hidrológica principal y las estaciones automáticas. La topografía se representa únicamente en el área donde se ha calibrado el módulo nival

Para este trabajo se han utilizado diferentes tipos de datos: meteorológicos (precipitaciones y temperaturas horarias), hidrológicos (caudales horarios), un Modelo de Elevación Digital (MED) e imágenes georeferenciadas de la extensión de la cubierta nival.

Los datos meteorológicos son proporcionados por 3 estaciones automáticas de la red de la AEMet, de las que se reciben datos en tiempo real en el CECU-CHC, y 2 estaciones de la red SAI-CHC. Estas estaciones proporcionan al modelo datos de precipitación y temperatura horarias. Los caudales medios horarios son dados por la estación automática perteneciente a la red SAICA que, en la CHC, proporciona tanto parámetros de calidad como hidrometeorológicos. El MED, a partir del cual se tiene la cota media en cada celda de la cuenca, se ha obtenido a partir de los mapas topográficos 1: 5.000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN). La resolución espacial de este MED es de 500 metros. La extensión diaria del área cubierta por la nieve se ha estimado con las imágenes obtenidas por el sensor MODIS de la NASA (ver apartado 3.1). Para el periodo de estudio se han seleccionado un total de 25 imágenes (11 para la calibración y 14 en la validación), los días en que la zona de Picos de Europa se encontraba libre de nubes y cubierta, al menos parcialmente, por la nieve. Así mismo, para cada año hidrológico, se ha buscado la primera y la última imagen sin nieve, para comprobar si el modelo pronostica correctamente las primeras nieves otoñales y la desaparición del manto nival al final de la primavera.

3 Metodología

3.1 Superficie Innivada

Para obtener la extensión del área cubierta por la nieve se han utilizado las imágenes captadas por el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), alojado en los satélites polares Aqua y Terra de la NASA. El sensor MODIS analiza diariamente la superficie terrestre y la atmosfera, con multitud de canales centrados en 36 bandas espectrales, que abarcan longitudes de onda desde 0.4 μm (visible) a 14.4 μm (infrarrojo). La resolución espacial de estas imágenes está entre los 250 m y 1 km (Barnes et al., 1998).

Combinando diferentes canales mediante técnicas especiales, como la RGB (Red-Green-Blue) en falso color, es posible identificar las áreas cubiertas por la nieve (Hall et al., 2002). Las imágenes RGB en falso color que se

utilizan se generan durante el día a partir de la combinación de 2 canales visibles y uno infrarrojo (azul: $0.63 \mu\text{m}$; verde: $0.86 \mu\text{m}$ y rojo: $2.1 \mu\text{m}$). Mediante esta técnica la nieve y las nubes altas (formadas por cristales de hielo) aparecen realzadas en color cian, las nubes (formadas por gotas de agua) de color blanco, las zonas con vegetación con colores verdosos y los mares y océanos oscuros (figura 2). Es importante seleccionar los días totalmente despejados, ya que las nubes altas se confunden con la nieve al reflejar la luz solar de manera muy parecida.

A partir de las imágenes RGB en falso color se han extraído las 3 bandas de color primario que la componen. Cada color primario se codifica con un byte, lo que significa que puede tomar 256 valores diferentes. Así, la intensidad de cada una de las componentes se mide en una escala que va del 0 (no interviene en la mezcla) al 255 (intensidad máxima). En la banda 3, que corresponde al color azul, las celdas innivadas tienen una gran intensidad de color. Por tanto, para cada imagen, se ha establecido un umbral de intensidad para el color azul, a partir del cual se han identificado las celdas que tienen nieve de las que no, según un análisis visual de la imagen RGB (figura 2). Umbrales entre 90 y 130 se han mostrado como buenos limitadores de la superficie innivada.

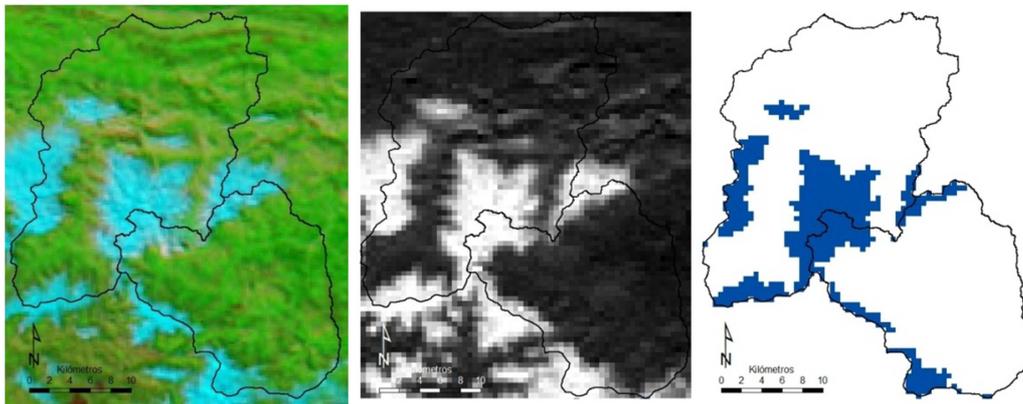


Figura 2 Validación del método para estimar las celdas innivadas el día 04/05/2010. Imagen MODIS RGB en falso color de 250 m (izquierda) a partir de la cual se extrae la banda 3, con una resolución espacial de 500 m (centro). En la imagen de la derecha se identifican las celdas innivadas, estableciendo un umbral para la intensidad de la banda 3

3.2 Descripción del Modelo

El módulo nival (figura 3) es el incluido en el modelo GSM-SOCONT (Glacier and SnowMelt-SOil CONTRibution), desarrollado en la École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Este modelo es el que se emplea en el proyecto MINERVE (Jordan et al., 2008; García, 2011), sistema de alerta temprana por avenidas en la cuenca alta del Ródano, en el cantón suizo de Valais. El modelo ha sido utilizado también para estimar los efectos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico y la evolución glaciar en cuencas suizas de alta montaña (García et al., 2009).

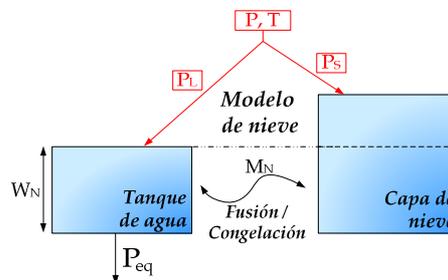


Figura 3 Esquema conceptual del módulo nival en GSM-SOCONT

La cuenca ha sido dividida en celdas regulares de 500 m a partir del MED. En cada una de estas celdas se calcula la temperatura y precipitación horarias a partir de los datos recogidos en las estaciones meteorológicas cercanas

(figura 1) con el método de la inversa de la distancia al cuadrado. Se ha asumido que la temperatura del aire T y la precipitación P varían linealmente con la altura z (dP/dz y dT/dz). Estudios climáticos realizados en esta zona (Marquínez et al., 2003) revelan la fuerte relación existente entre la elevación y las precipitaciones anuales y estacionales. Sin embargo, esta correlación se ha demostrado mucho menos clara para precipitaciones horarias. Por tanto, estos gradientes serán parámetros a calibrar y se supondrán constantes para todo el periodo simulado (Huss et al., 2008).

Para distinguir entre precipitación líquida P_L y sólida P_S se utilizan dos umbrales de temperatura, T_{c1} y T_{c2} . Cuando la temperatura es inferior a T_{c1} toda la precipitación es en forma de nieve y si la temperatura supera T_{c2} se tiene precipitación líquida. En el caso de que la temperatura se encuentra entre los dos límites se asume una variación lineal en la proporción de lluvia y nieve. GSM-SOCONT calcula, para cada celda de la cuenca, el balance de masa en la nieve con un modelo de fusión conceptual, de tipo índice térmico o grado-día (Schaeffli et al., 2005). Estos modelos están basados en la relación lineal entre la temperatura del aire T y la tasa de fusión de nieve M_N (Hock, 1999). Esta tasa se calcula de la siguiente manera:

$$M_N = \begin{cases} A_n \cdot (1 + b_p \cdot P_L) \cdot (T - T_{cr}) & : T \geq T_{cr} \\ A_n \cdot (T - T_{cr}) & : T < T_{cr} \end{cases} \quad (1)$$

donde A_n es el coeficiente grado-día, b_p es un factor que mayoriza la intensidad de fusión cuando se tiene lluvia y T_{cr} es el umbral de temperatura a partir del cual la nieve empieza a fundir.

La incorporación de parámetros de radiación en la ecuación 1 ha demostrado dar mejores resultados en las estimaciones de deshielo (Kustas y Rango, 1994). Sin embargo, la escasez de datos en tiempo real en esta zona de alta montaña y la necesidad de un modelo parsimonioso nos ha hecho descartar la utilización de aproximaciones más complejas. Por otra parte, Ohmura (2001) demostró que la base física de los modelos grado-día es más sólida de lo que, en principio, se suponía.

El resultado del módulo nival es la precipitación equivalente P_{eq} , que se obtiene mediante el balance de masa en el stock de nieve:

$$P_{eq} = P_L + M_N - \frac{dW_N}{dt} \quad (2)$$

donde W_N es la altura de agua que contiene la nieve y t es el paso de tiempo.

La precipitación equivalente P_{eq} , resultante del balance de masa en la nieve, se transfiere a los modelos hidrológicos, operativos en el CECU-CHC, para el cálculo de los caudales en los distintos puntos de control del sistema. En la actualidad, además de GSM-SOCONT, existe otro modelo hidrológico, PRESCO (modelo de PRecipitación-ESCOrrentía), encargado de transformar la P_{eq} y la evapotranspiración potencial ETP , en caudales horarios. PRESCO (Lorenzo y Deval, 2010) es un modelo de balance continuo de componentes de base física. Está constituido por una serie de depósitos conceptuales interconectados que representan la respuesta hidrológica de los distintos elementos que componen el ciclo hidrológico (evaporación, infiltración en medio no saturado, percolación al acuífero, escorrentía directa, flujo base, etc.). Este modelo es el que se utiliza en el presente trabajo para simular los caudales horarios en la estación de aforo ubicada en la zona de estudio (figura 1).

3.3 Calibración del Modelo

Para la calibración del modelo se ha utilizado un método iterativo semiautomático, el esquema del cual se muestra en la figura 4. La cuestión inicial ha sido si utilizar una metodología automática, basada únicamente en la optimización de unas funciones objetivo, que minimizan los errores a lo largo de diferentes episodios, o utilizar otros métodos más subjetivos, según el criterio "experto" del hidrólogo.

Si bien la calibración automática tiene la ventaja de que, una vez establecido el método, es independiente del usuario que la utilice, se ha visto que tiene algunos condicionantes, que pueden ser determinantes. La función objetivo prioriza ciertos elementos por encima de otros que a la larga pueden resultar importantes. Por otra parte, estas funciones no son capaces de tener en cuenta o relativizar ciertos errores asociados a los datos medidos y los resultados pueden no gustar una vez son visualizados (Corral, 2004). Se cree que esto se debe a que en las funciones objetivo no se han podido incorporar ciertos criterios subjetivos que están en la mente del hidrólogo (Boyle et al., 2000). Por esto, el procedimiento elegido es mixto y consiste, para cada paso, en una primera optimización de los parámetros con las funciones objetivo propuestas y un posterior reajuste manual con la comparación visual de los valores medidos.

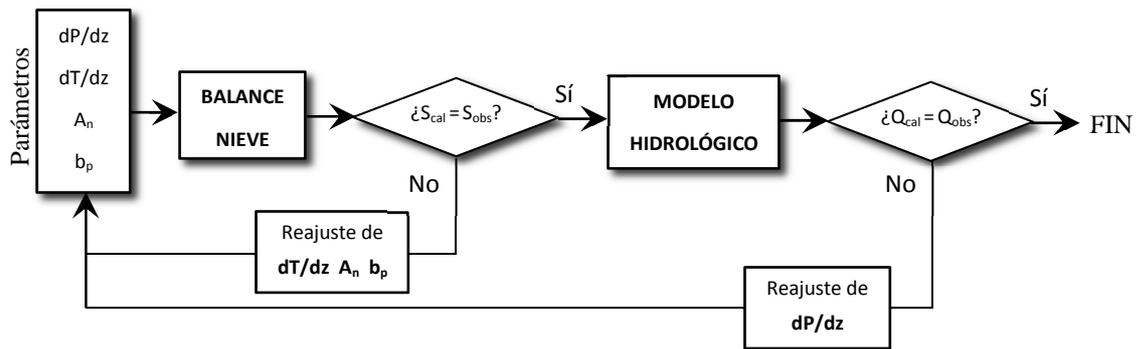


Figura 4 Procedimiento de la calibración. En el paso 1 son calibrados los parámetros de fusión y el gradiente de temperatura con la extensión del manto nival. En el paso 2 se calibra el gradiente de precipitación con los caudales de la estación de aforos

El modelo nival se compone de un total de 7 parámetros (A_n , b_p , dT/dz , dP/dz , T_{cr} , T_{c1} y T_{c2}) susceptibles de ser calibrados. Con el fin de aumentar la parsimonia del modelo se ha reducido el número de parámetros a calibrar mediante un análisis previo de todos ellos (Jordan, 2007). A partir de esto, T_{cr} , T_{c1} y T_{c2} se han fijado constantes, restringiendo así la calibración a 4 (A_n , b_p , dT/dz y dP/dz). El coeficiente grado-día A_n y el coeficiente de fusión con la lluvia b_p intervienen en los procesos de deshielo y dP/dz , principalmente, en los de acumulación, mientras que dT/dz influye en ambos.

En el primer paso de la calibración, partiendo de un dP/dz arbitrario, se ajustan A_n , b_p y dT/dz mediante la comparación de la extensión del manto nival calculado y el observado con las imágenes de satélite. La función F , ya utilizada con anterioridad para testar el ajuste de la mancha de inundación en modelos hidráulicos (Horrit et al., 2007), proporciona la bondad del ajuste:

$$F = \frac{A}{A + B + C} \quad (0 < F < 1) \quad (3)$$

donde A es el número de píxeles con nieve en la imagen simulada y la observada, B es el número de píxeles con nieve en la imagen simulada y que no la tienen en la observada y C son los píxeles con nieve observada pero no simulada. Este procedimiento es repetido para todos los días en los que las imágenes de satélite están disponibles. Así mismo, para complementar este indicador, se calcula también la relación entre la superficie simulada y la observada r_{Sup} .

En el siguiente paso se ajusta el parámetro de acumulación dP/dz con los caudales medidos en la estación de aforo. La función objetivo utilizada es el índice de Nash y Sutcliffe (1970), definido como:

$$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum (Q_{\text{calc}} - Q_{\text{obs}})^2}{\sum (Q_{\text{obs}} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2} \quad (-\infty < \text{Nash} < 1) \quad (4)$$

donde Q_{calc} es el caudal horario estimado por el modelo, Q_{obs} es el caudal horario medido en la estación de aforo y $\overline{Q_{\text{obs}}}$ es el caudal horario medio registrado. Además de éste, para confirmar la bondad de los ajustes, se han utilizado otros índices, como la relación entre los volúmenes totales de caudal simulado y registrado r_{vol} y el coeficiente de correlación lineal r^2 . Una vez se ha obtenido este primer ajuste mediante la optimización de las funciones objetivo, se analizan visualmente la extensión del manto nival y los hidrogramas y se retocan los parámetros cuando se considera necesario.

El periodo de calibración, en el cual se ha entrenado el modelo, ha sido el año hidrológico 2009/2010 (1 oct. – 30 sept.), por ser éste el primero para el que se dispone de unas series meteorológicas y foronómicas completas a escala horaria. La validación del ajuste, que sirve para verificar la bondad del modelo en episodios diferentes a los que le han servido de aprendizaje, se realiza para el año hidrológico en curso, 2010/2011 (1 oct. – 31 mayo.)

4 Resultados

En la tabla 1 se presentan los resultados de las funciones de optimización. Se comprueba que, en general, son similares para el periodo de calibración y el de validación. Esta leve diferencia entre unos y otros nos lleva a pensar que estamos frente a un modelo robusto.

Tabla 1 Valores de las distintas funciones objetivo para la calibración y validación del modelo. Los valores de F y r_{Sup} están promediados para los días con imágenes disponibles

Periodo	F	r_{Sup}	Nash	r^2	r_{vol}
Calibración (1 oct. 2009-30 sept. 2010)	0.64	0.91	0.71	0.74	0.97
Validación (1 oct. 2010 -31 mayo 2011)	0.65	0.90	0.60	0.72	1.04

4.1 Superficie Innivada

El valor medio de F y la comparación de la extensión del manto nival simulado y observado (figuras 5 y 6) nos indican que el modelo es capaz de pronosticar con bastante exactitud la ubicación de las celdas innivadas. Del examen de ambas figuras se aprecia que el modelo, aunque tiende a subestimar la extensión del área innivada, se comporta de una manera fiable tanto en los periodos en los que la mancha de la nieve es reducida como en aquellos en los que la cuenca se encuentra casi totalmente innivada. La subestimación del área innivada se ve confirmada por el parámetro r_{Sup} , que toma valores inferiores a 1 para los dos periodos de la simulación.

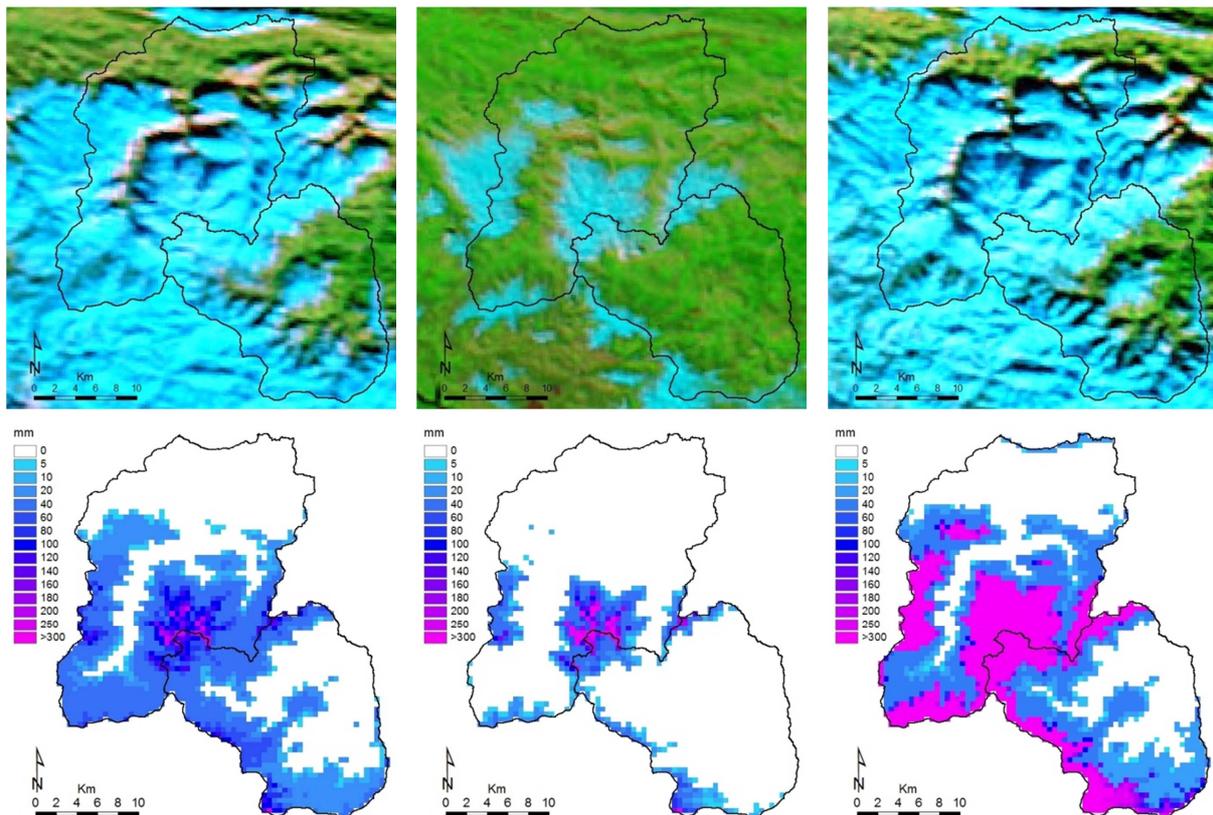


Figura 5 Superficie Innivada observada (arriba) y simulada (abajo) los días 02/02/2010 (izquierda), 17/05/2010 (centro) y 26/12/2010 (derecha). Los espesores simulados están expresados en milímetros de agua equivalente

Las imágenes del 2 de febrero y del 26 de diciembre de 2010 (figura 5) muestran una extensión de la superficie innivada similar, sin embargo, en la última, los espesores acumulados en cotas altas son mucho mayores. Esto se

debe a que los ciclos hielo-deshielo, durante el año hidrológico 2009/2010, son más pronunciados y, por tanto, afectan a celdas más elevadas. Así, estas celdas acumulan espesores menores ya que han estado expuestas a periodos más cálidos que durante el 2010/2011, lo que indica que las temperaturas durante 2009/2010 fueron más extremas (alternancia brusca de periodos cálidos y fríos). Este hecho se ve reflejado en la figura 6, donde se aprecia que los ciclos de avance-retroceso del manto nival son más marcados en el 2009/2010.

Del análisis de la figura 6 se puede decir que en el periodo de calibración la temporada de nieve fue mucho más larga, las nevadas se prolongaron hasta mitad del mes de junio y fueron más extensas (el 11 de Enero de 2010 casi el 100% de la cuenca estaba cubierta por la nieve). En el 2010/2011 la temporada ha sido mucho más corta, y prácticamente no ha nevado a partir de abril, si bien el porcentaje de superficie innivada ha disminuido más lentamente ya que en cotas altas se tenía más nieve acumulada (figura 5).

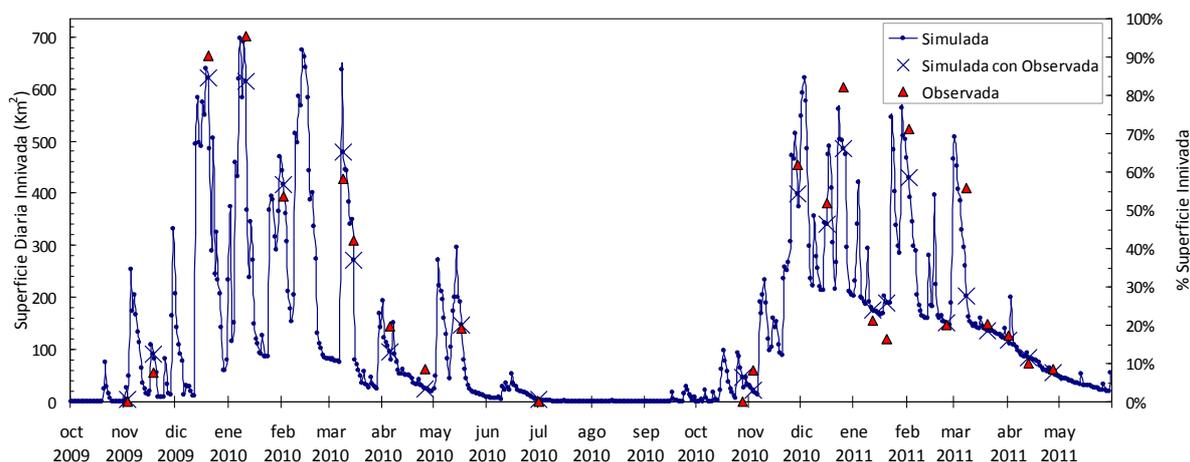


Figura 6 Evolución de la superficie diaria innivada simulada y observada durante el periodo de calibración y validación. La superficie simulada, el día en el que está disponible la superficie observada, está señalada con una aspa

Comparando los valores de la superficie innivada calculada por el modelo y la observada, los días en que esto ha sido posible (figura 6), se puede afirmar que el modelo es capaz de pronosticar con solvencia los ciclos de fusión-acumulación e, incluso, la magnitud de éstos. Si bien hay días, como el 8 de marzo de 2011, en los que la superficie observada y pronosticada se separan, observando los valores precedentes o posteriores se comprueba que se reproduce correctamente la tendencia en la evolución de la superficie innivada.

4.2 Caudales

El módulo nival da el valor de precipitación equivalente que, junto con la *ETP*, emplean como entrada los modelos hidrológicos del CECU-CHC. Para el ajuste del modelo hidrológico en la estación del río Deva en Panes, se han empleado los mismos periodos de calibración y de validación que para el módulo de nieve. En la figura 7 puede observarse el ajuste del modelo en ambos periodos, así como el detalle durante el episodio de grandes avenidas que tuvo lugar en las cuencas cantábricas en junio de 2010 (dentro del periodo de calibración del modelo).

En la figura 8 se representan los caudales observados y simulados durante el período de validación. Ambas curvas presentan un razonable acuerdo, reproduciéndose aceptablemente los ciclos de crecidas y recesión de caudales. Cabe hacer notar la excepción de dos fechas concretas, el 1 de noviembre de 2010 y el 22 de febrero de 2011, en las que el caudal observado llegó a ser el doble y el triple, respectivamente, del simulado. Fuera de esas fechas el comportamiento del modelo conjunto (módulo nival y módulo hidrológico) durante el periodo de validación es bueno, reproduciendo puntas observadas de caudal superiores a 200 m³/s. Los índices de Nash, calculados con los caudales horarios observados y simulados, refuerzan esta idea, tomando un valor de 0.72 en el periodo de calibración y de 0.60 en el de validación.

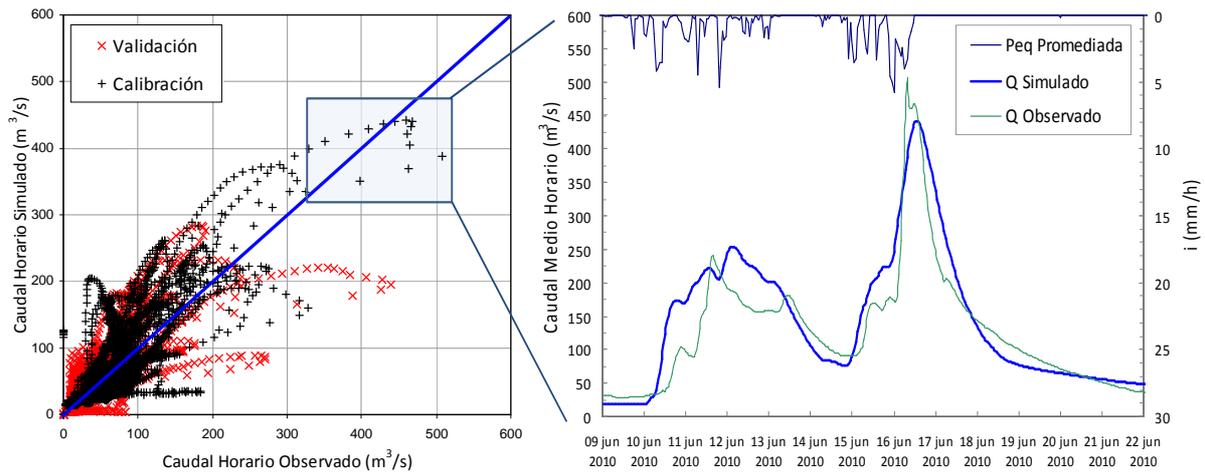


Figura 7 En el gráfico de la izquierda se representan los caudales medios horarios observados frente a los simulados para el periodo de calibración y el de validación. El área sombreada corresponde a los caudales punta del episodio del 09 al 22 de junio de 2010. En la imagen de la derecha se tiene el hidrograma observado y simulado para dicho periodo

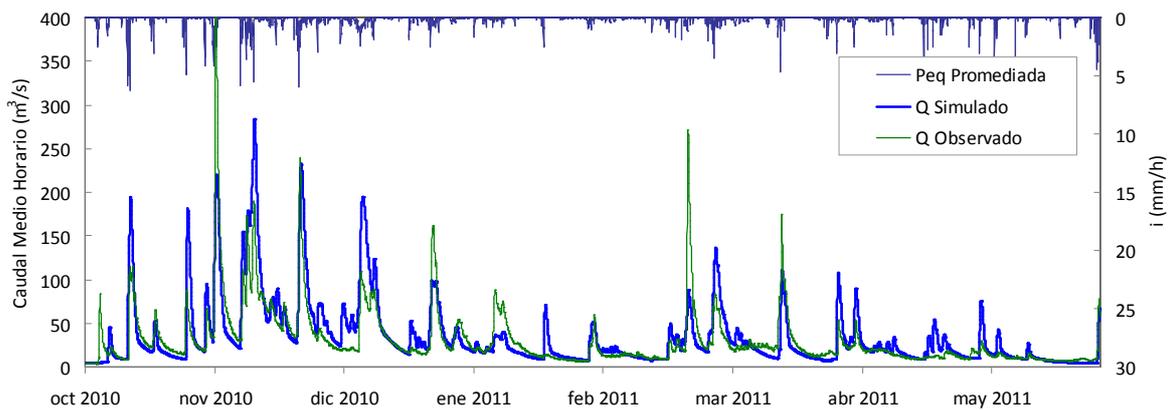


Figura 8 Hidrograma simulado y observado para el periodo de validación

5 Conclusiones

Un módulo nival de carácter distribuido ha sido implementado en las cuencas del Cantábrico. Éste proporciona el volumen estimado de precipitación líquida y sólida (nieve) en cada celda y en cada subcuenca, así como la extensión del manto de nieve, a partir de datos horarios de precipitación y temperatura de las estaciones pluviométricas y termométricas disponibles. A continuación, el modelo hidrológico operativo en el CECU-CHC estima y pronostica el caudal en diferentes puntos de la red hidrográfica.

El módulo nival se ha calibrado y validado en las cuencas de cabecera del río Deva y su afluente el Cares, enclavadas en los Picos de Europa, en la Cordillera Cantábrica. La calibración del módulo nival se ha realizado mediante un proceso iterativo semiautomático, comparando la superficie del manto de nieve simulada por el modelo con la observada a partir de imágenes del sensor MODIS de los satélites Aqua y Terra (NASA), así como los caudales horarios simulados y observados en la estación de aforo de cierre.

Se ha comprobado la robustez y fiabilidad del modelo, con índices de la bondad del ajuste del modelo aceptables tanto para el periodo de calibración como para el de validación. Así mismo, el módulo nival reproduce con fidelidad la evolución de la superficie innivada, captando adecuadamente los avances y retrocesos del manto de

nieve. A su vez, la simulación de caudales con el modelo conjunto, nival e hidrológico, ofrece resultados esperanzadores de cara al pronóstico de caudales, lo que constituye uno de los objetivos del CECU-CHC, como parte de la implantación del Sistema de Alerta Temprana por avenidas y el Sistema de Ayuda a la Decisión.

Aunque se dispone aún de pocos datos como para extraer conclusiones definitivas, el buen comportamiento del modelo en el periodo de estudio, en lo referente a la evolución de la extensión del manto de nieve y a la estimación de caudales, hace suponer que también será razonablemente fiable la estimación del volumen de agua acumulada en forma de nieve, lo que resulta de gran interés para la adecuada gestión de los recursos hídricos, y también de cara a la previsión de avenidas.

El funcionamiento del modelo en modo operacional requiere de la disponibilidad de datos de precipitación y temperatura en tiempo real. De las estaciones termo-pluviométricas automáticas actualmente disponibles, ninguna de ellas se sitúa en el interior de la cuenca nival simulada, y están a mucha menor cota que las zonas elevadas de los Picos de Europa, lo que dificulta el conocimiento preciso de estas variables en las cuencas simuladas. Esto introduce ciertas incertidumbres en la calibración del modelo, que podrían explicar, al menos en parte, algunas diferencias puntuales importantes entre los valores simulados y observados de extensión del manto nival y del caudal en el punto de cierre de la cuenca vertiente.

También se adolece de suficientes datos como para conocer los espesores reales del manto de nieve y su variabilidad temporal y espacial. A pesar de los esfuerzos y del notable avance que ha supuesto el programa ERHIN (Estudio de los Recursos Hidráulicos procedentes de la Innivación) de la Dirección General del Agua (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino), en la zona de estudio sólo se dispone de unos pocos datos puntuales de medidas de espesor en pértigas con un máximo de dos valores anuales. Estos datos son de difícil comparación con los resultados del modelo, a los efectos de su calibración o validación, debido a que pueden verse afectados de forma importante por procesos de ablación o de transferencia de nieve de unas zonas a otras (ventisca, aludes, etc.), o bien por condiciones locales de acumulación o fusión reforzada por depresiones del terreno, zonas de umbrías o solanas, etc., procesos que no son contemplados por el modelo.

Podemos pues concluir que el módulo nival contribuye eficazmente al objetivo de implementar un sistema operacional de previsión hidrológica en la CHC. La mejora constante de este sistema y el mejor conocimiento de las incertidumbres resultantes de los módulos nival e hidrológico, así como del sistema completo, se perfilan hoy en día como los siguientes objetivos a resolver dentro de un proceso de mejora continua de los resultados y de su comprensión.

6 Bibliografía

- Barnes, W. L., Pagano, T. S. y Salomonson, V. V. (1998). "Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS AM1." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 12, pp. 1723-1744.
- Boyle, D. P., Gupta, H. V. y Sorooshian, S. (2000). "Toward improved calibration of hydrological models: Combining the strengths of manual and automatic methods." *Water Resources Research*, vol. 36, pp. 3663-3674.
- Corral, C. (2004). "Desenvolupament d'un model hidrològic per incorporar informació del radar meteorològic. Aplicació operacional a la conca del riu Besòs." Tesis Doctoral. Grup de Recerca Aplicada en Hidrometeorologia. Universitat Politècnica de Catalunya.
- García Hernández, J., Deval Castillo, J., Boillat, J.-L. y Schleiss, A. J. (2009). "Effect of climate change on hydrological cycle and evolution of the Rhone Glacier." 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment.
- García Hernández, J. (2011). "Flood management in a complex river basin with a real-time decision support system based on hydrological forecasts." Tesis Doctoral N°5093. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Hall, D. K., Riggs, G. A. y Salomonson, V. V. (2002). "MODIS snow cover products." *Remote Sens. Environ.*, vol. 34, pp. 127-140.
- Hock, R. (1999). "A distributed temperature-index-ice and snowmelt model including potential direct solar radiation." *Journal of Glaciology*, vol. 45, pp. 101-111.
- Horrit, M. S., Di Baldassarre, G., Bates, P.D. y Brath, A. (2007). "Comparing the performance of 2-D finite element and finite volume models of floodplain inundation using airborne SAR imagery." *Hydrological Processes*, vol. 21, pp. 2489-2507.

- Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A. y Funk, M. (2008). "Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate." *Hydrological Processes*, vol. 22, pp. 3888-3902.
- Jordan, F. (2007). "Modèle de prévision et de gestion des crues. Optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue." Tesis Doctoral N°3711. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Jordan, F., García Hernández, J., Dubois, J. y Boillat, J.-L. (2008). "MINERVE: Modélisation des intempéries de nature extrême du Rhône valaisan et de leurs effets." Communication 38 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, A. Schleiss ed., EPFL, Lausanne, ISSN 1661-1179.
- Kustas, W. P. y Rango, A. (1994). "A simple energy budget algorithm for the snowmelt runoff model." *Water Resources Research*, vol. 30, pp. 1515-1527.
- Lorenzo Riera, J. L. y Deval Castillo, J. (2010). "Modelo Hidrológico PRESCO. Manual Técnico." Informe interno de OFITECO (no publicado).
- Marquínez, J., Lastra, J. y García, P. (2003). "Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis." *Journal of Hydrology*, vol. 270, pp. 1-11.
- Nash, J. V. y Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models." *Journal of Hydrology*, vol. 10, pp. 282-290.
- Ohmura, A. (2001). "Physical basis for the temperature-based melt-index method." *Journal of Applied Meteorology*, vol. 46, pp. 367-374.
- RIBAMOD (1997). "River Basin modeling management and flood mitigation concert action." European Comission DGXII, Luxemburgo.
- Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M. y Musy, A. (2005). "A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, vol. 2, pp. 73-117.