



# El programa ERHIN y la gestión de embalses en áreas con alta precipitación nival

MIGUEL ARENILLAS PARRA (\*), GUILLERMO COBOS CAMPOS (\*\*), y JUSTO MORA ALONSO-MUÑOYERRO (\*\*\*)

**RESUMEN** En determinados sectores del territorio español (Pirineos, Cordilleras Cantábrica e Ibérica, Sistema Central y Sierra Nevada) la precipitación nival alcanza valores significativos durante el invierno, que conducen a espesores de nieve persistentes en las cuencas alimentadoras de numerosos embalses y a la fusión rápida de esta nieve en períodos cortos de tiempo, directamente relacionados con la elevación de la isoterma de cero grados en primavera. Estos procesos condicionan la gestión de los mencionados embalses.

Hace veinte años la entonces Dirección General de Obras Hidráulicas (hoy Dirección General del Agua) puso en marcha el programa ERHIN (siglas de "Estudio de Recursos Hídricos procedentes de la Innivación") con objeto de cuantificar los indicados procesos y facilitar con ello la gestión de los embalses situados al pie de las principales cordilleras del territorio español.

A lo largo de estos años se han ido desarrollando y mejorando distintos sistemas de control del manto nival (desde la medición directa hasta imágenes de satélite) en las mencionadas áreas de montaña y se ha puesto a punto un modelo informático (ASTER) que por un lado permite simular el volumen de agua en forma de nieve (distribución espacio-temporal) y por otro plantear previsiones sobre la evolución del estado hidrológico (caudales circulantes).

En la actualidad el modelo ASTER se está implantando en los SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica) de las principales cuencas españolas, con buenos resultados ya comprobados en las cuencas del Ebro (Pirineos) y del Tajo (Sistema Central). Las características básicas del Programa EHRIN y del modelo ASTER, así como los resultados hasta ahora obtenidos, se analizan en este artículo.

## THE ERHIN PROGRAMME AND RESERVOIR MANAGEMENT IN AREAS OF HIGH NIVAL PRECIPITATION

**ABSTRACT** *In certain areas of Spain (The Pyrenees, The Cantabrian and Iberian ranges, the Central Highlands and the Sierra Nevada) nival precipitation reaches significant levels during the winter, leading to long-lasting thicknesses of snow in the catchment areas of numerous reservoirs. The rapid melting of this snow in short periods of time is directly related to the increase of the zero degree isotherm in spring. These processes influence the management of the aforementioned reservoirs.*

*Twenty years ago, the then National Hydraulic Works Authority (now the National Water Authority) initiated the ERHIN programme (abbreviation of the Study on Water Resources Originating from Innivation). The object of this was to quantify the specified processes and thus enable the management of those reservoirs situated at the foot of the principal Spanish mountain ranges.*

*Over the years different snow blanket control systems in these mountain areas have been developed and improved (from direct measurement to satellite imagery) and a computer model (ASTER) has been implemented. This enables both the simulation of the water volume in the form of snow (time-space distribution) and the planning of hydrological forecasts (circulating flows).*

*Presently, the ASTER model is being implemented in the SAIH (Automatic Hydrological Information System) of the principal Spanish basins. Good results have been demonstrated in the Ebro basin (Pyrenees) and the Tajo basin (Sistema Central). The basic characteristics of the EHRIN programme and the ASTER model, along with the results obtained to date, are analysed in this article.*

**Palabras clave:** Modelos hidrológicos, Cobertura nival, Gestión de embalses, Recursos hídricos, Previsión de caudales, Teledetección, Modelo Aster.

(\*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, España.

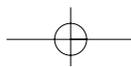
(\*\*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia, España.

(\*\*\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Confederación Hidrográfica del Tajo, España.

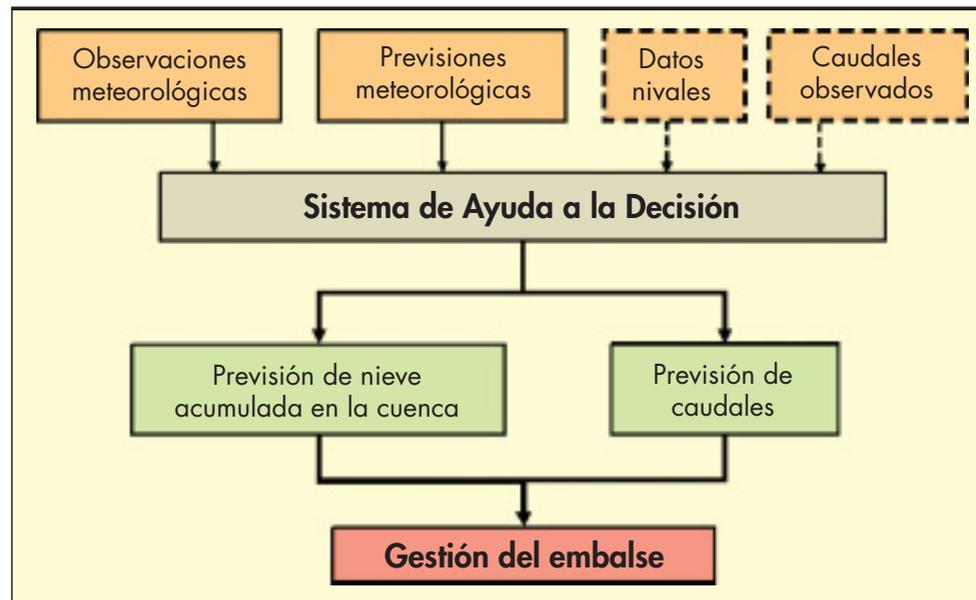
## 1. INTRODUCCIÓN

El embalse es una infraestructura hidráulica fundamental para la gestión de los recursos hídricos, especialmente en cuencas con escasa regulación natural y gran variabilidad meteorológica (espacial y temporal).

Esto queda patente en: situación ordinaria, donde el objetivo perseguido en la gestión es la obtención del máximo al-



## EL PROGRAMA ERHIN Y LA GESTIÓN DE EMBALSES EN ÁREAS CON ALTA PRECIPITACIÓN NIVAL



**FIGURA 1.** Esquema de funcionamiento del modelo nival de ayuda a la gestión de embalses.

macenamiento de agua en los embalses, todo ello supeditado a la satisfacción de las demandas, así como las necesidades ambientales de la cuenca; en situaciones meteorológicas extremas que generan inundaciones, donde se adopta como criterio prioritario de gestión de los embalses la laminación de los caudales fluyentes, para minimizar los daños materiales y humanos potenciales; y en situaciones extremas de sequía, donde se debe realizar una gestión de los recursos almacenados para satisfacer en lo posible y de forma priorizada las necesidades existentes, incluidas las correspondientes para asegurar la biodiversidad fluvial.

Los criterios de gestión que han sido descritos previamente de una forma muy general, adquieren unos condicionantes muy particulares en el caso de que en la cuenca de estudio el fenómeno nival sea relevante desde el punto de vista hidrológico. Por ello, en los apartados siguientes se trata de forma detallada la gestión de los embalses emplazados en estas cuencas.

## 2. EL FENÓMENO NIVAL Y LA GESTIÓN DE EMBALSES

La gestión de los recursos hídricos almacenados en los embalses viene condicionada por la disponibilidad de información. Dentro de esta información debe incluirse la proporcionada por los sistemas de información hidrológica, que debe ser complementada por información de previsiones meteorológicas y por los resultados obtenidos de modelos hidrológicos e hidráulicos de simulación y previsión, y la correspondiente a las demandas existentes en cada momento.

En cuencas de montaña, además de las habituales variables hidrológicas que definen el estado de humedad de la cuenca, volúmenes almacenados en los embalses, caudales fluyentes y recursos hidrogeológicos, adquieren una gran importancia las variables que cuantifican los recursos hídricos almacenados en forma de nieve.

El fenómeno nival produce una regulación natural de los recursos hídricos, generando una acumulación de los mismos a cotas altas, que fluye a modo de escorrentía hasta alcanzar los embalses en función de diversas variables climatológicas, entre las que se encuentran la temperatura, la precipitación, radiación humedad y velocidad del viento.

Esta circunstancia hace que se requiera de un tratamiento específico para la cuantificación de los recursos nivales, así como de la previsión de su evolución a lo largo del tiempo y de las correspondientes aportaciones que proceden de su fusión para la correcta gestión de los embalses emplazados aguas abajo (ver fig. 1).

## 3. EL PROGRAMA ERHIN

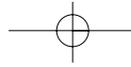
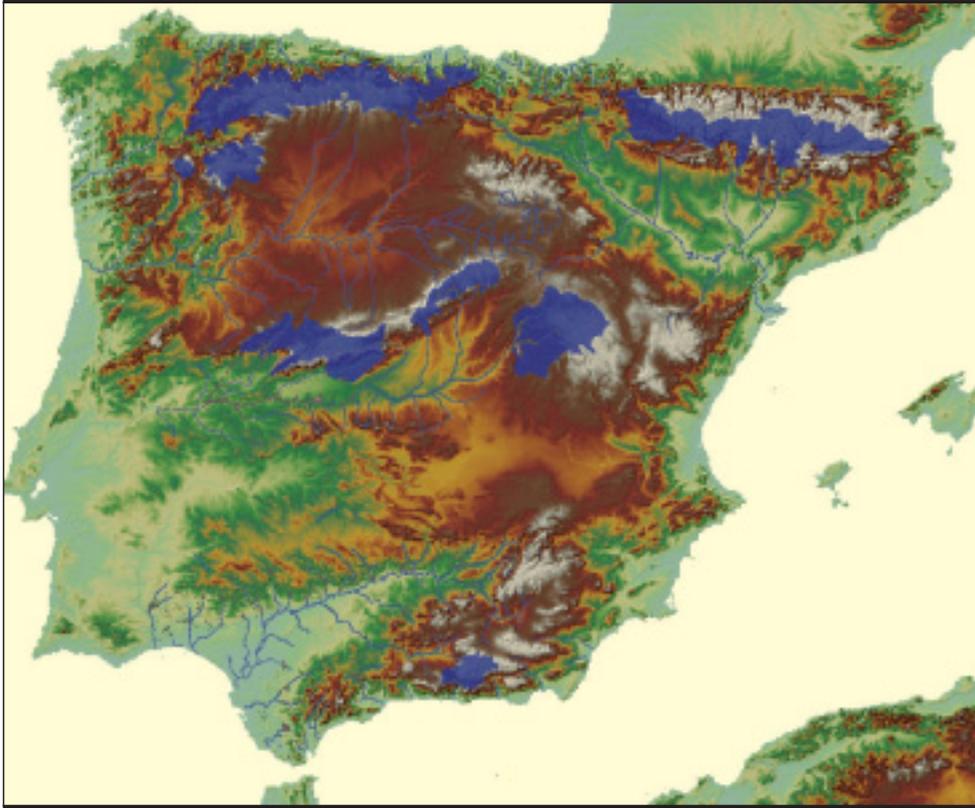
La administración española, desde el Ministerio de Medio Ambiente, amparada en la inquietud social, cada vez más creciente, que genera la gestión de los recursos hídricos, ha promovido diversos programas encaminados a aminorar las incertidumbres hidrológicas y realizar una gestión óptima de los embalses.

En determinados sectores del territorio español (Pirineos, Cordilleras Cantábrica e Ibérica, Sistema Central y Sierra Nevada) la precipitación nival alcanza valores significativos durante el invierno, que conducen a espesores de nieve persistentes en las cuencas alimentadoras de numerosos embalses y a la fusión rápida de esta nieve en períodos cortos de tiempo, directamente relacionados con la elevación de la isoterma de cero grados en primavera.

Hace veinte años la entonces Dirección General de Obras Hidráulicas (hoy Dirección General del Agua), conocedora de la importancia del fenómeno nival en la gestión de los recursos hídricos, puso en marcha el programa ERHIN (siglas de "Estudio de Recursos Hídricos procedentes de la Innivación") con objeto de cuantificar los indicados procesos y facilitar con ello la gestión de los embalses situados al pie de las principales cordilleras del territorio español.

Inicialmente, en el año 1986, el ámbito de actuación se fijó en el Pirineo, si bien se amplió posteriormente a la Cordillera Cantábrica (1987), Sierra Nevada (1990) y Sistema Central (1996). Ver fig. 2.

Respecto a las actividades llevadas a cabo dentro del Programa ERHIN, han sido múltiples y variadas. Entre ellas debe destacarse la instalación de una red fija de medición de espesores y densidades del manto nival formada por pértigas y telenivómetros, realización de campaña de campo para toma de datos, utilización de imágenes saté-


**EL PROGRAMA ERHIN Y LA GESTIÓN DE EMBALSES EN ÁREAS CON ALTA PRECIPITACIÓN NIVAL**


**FIGURA 2.** Área del territorio español (en azul) donde se estudian los recursos hídricos procedentes de la acumulación nival. Programa ERHIN.

lite para la cuantificación de las superficies innivadas, realización de estudios para la aplicación de métodos hidrológico-estadísticos para la cuantificación de nieve acumulada y previsión de aportaciones, desarrollo de modelos de simulación hidrológica para la gestión de embalses de cabecera y su integración con el SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica) para facilitar el acceso a la información en tiempo real y la publicación de diversos libros con los resultados obtenidos de los trabajos desarrollados.

Apoyada en todos estos trabajos se plantea en el apartado siguiente la metodología que actualmente se está desarrollando para ayudar a la toma de decisiones en embalses de cabecera afectados por el fenómeno nival.

#### 4. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA AYUDAR A LA GESTIÓN DE LOS EMBALSES

##### 4.1. ESTRUCTURA

Se plantea un conjunto de técnicas y metodologías seleccionadas e integradas en un único modelo para la cuantificación de la cubierta nival y previsión de los caudales derivados de la fusión.

Esta integración tiene como objetivo principal la compatibilización de los datos nivales obtenidos del análisis de las mediciones directas en campo y la fotografía satélite, con los resultados nivales calculados por el modelo hidrológico de simulación a partir de datos meteorológicos, para aprovechar el efecto sinérgico del tratamiento simultáneo de toda la información disponible.

Como resultado final se ha desarrollado un sistema (aplicable en tiempo real) que, partiendo de unas previsiones me-

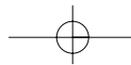
teorológicas, proporcione los resultados más probables de la evolución del manto nival (distribución y cuantificación del volumen de agua almacenado en forma de nieve) y de las aportaciones provenientes de su fusión. La aplicabilidad de estos resultados es evidente, ya que ayuda a la gestión de los embalses, tanto en situación ordinaria, como en situación extraordinaria.

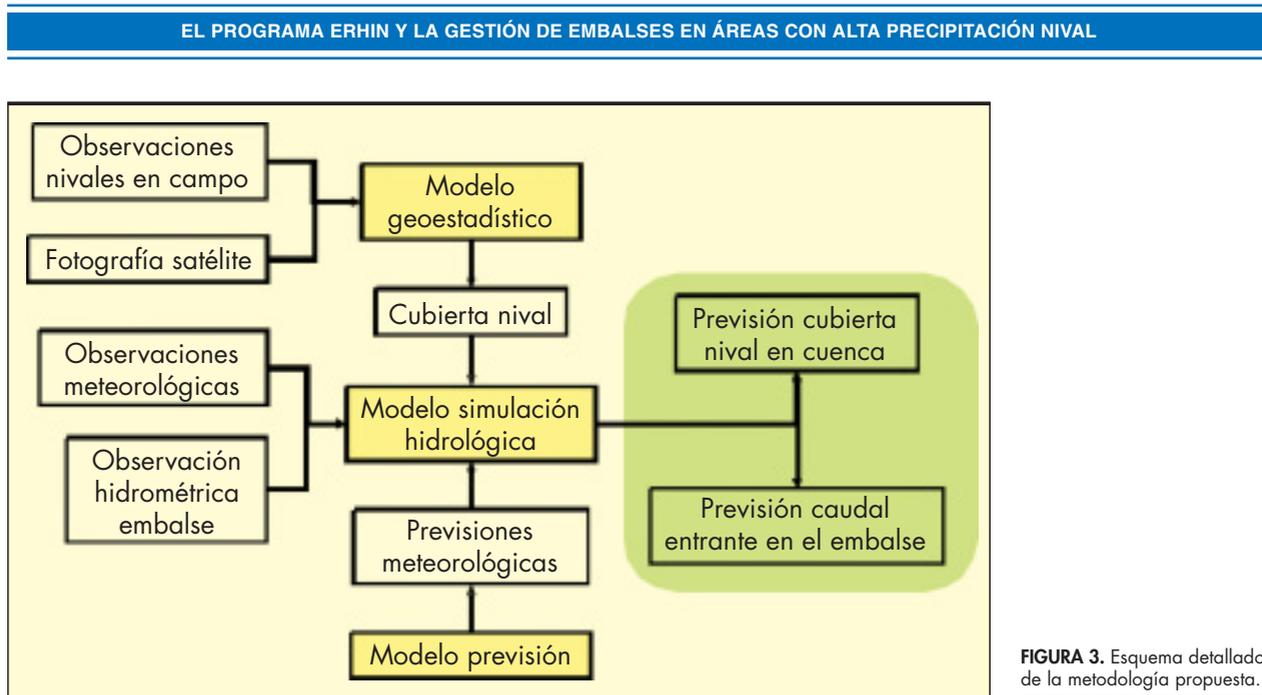
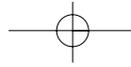
La metodología adoptada incluye dos modelos conceptuales diferentes. El primero es un modelo de simulación hidrológica (precipitación-escorrentía) y el segundo es un modelo geoestadístico que permite la cuantificación del manto nival para una fecha en la que se disponen de observaciones nivales (mediciones de campo y fotografía satélite). Estos dos modelos están sustentados sobre un mismo soporte de trabajo dando lugar al modelo conjunto (ver fig. 3).

Para la simulación hidrológica se ha seleccionado el modelo distribuido de simulación continua denominado AS-TER, desarrollado específicamente para su aplicación en cuencas con relieves abruptos, y con cambios meteorológicos muy marcados en el tiempo y en el espacio. Como principales ventajas del modelo debe destacarse la posibilidad de poder seleccionar las resoluciones espaciales y temporales para la simulación en función de las necesidades del usuario, el tratamiento desagregado que hace de las variables precipitación y temperatura y el análisis específico del fenómeno nival.

El modelo geoestadístico desarrollado para el tratamiento de la información nival se soporta sobre un SIG y permite realizar un tratamiento de la información puntual (pertigas y telenivómetros) y areal (fotografía satélite) mediante la aplicación de la siguiente expresión.

$$CEA_i = F(x, y, f(cota), T, t)$$





**FIGURA 3.** Esquema detallado de la metodología propuesta.

Donde:

CEA<sub>i</sub> – Columna equivalente de agua para un punto i(x, y, z) de la cuenca estudiada

F - Función de interpolación seleccionada

f(cota) – Ley de innivación que tiene en cuenta de forma determinista la variabilidad del volumen de agua en forma de nieve con respecto a la cota

T – Procedencia del dato

t – Instante temporal

Diseñado este modelo conjunto, la simple inclusión de una hipótesis meteorológica (precipitación y temperatura), permite realizar previsiones de la evolución de la cubierta nival y los caudales circulantes por el punto de control.

#### 4.2. COMPATIBILIZACIÓN DE INFORMACIÓN

Dado que existen diversos orígenes de información para el modelo planteado, como son el modelo digital del terreno (MDT), el propio modelo hidrológico distribuido, las estaciones hidro-meteorológicas, la fotografía satélite y las pértigas y/o telenivómetros de medida de nieve en campo, es necesario plantear un sistema preciso, pero sencillo, para su organización y gestión. Por ello, se ha adoptado el uso de un Sistema Información Geográfico, que se ha desarrollado sobre Arc View.

El SIG permite un tratamiento ágil y efectivo especialmente en el caso de la cubierta nival, íntimamente relacionada con la morfología del terreno, donde se puede disponer de información puntual (medidas de campo) y areal (fotografía satélite).

#### 4.3. CRITERIOS DE AJUSTE Y CALIBRADO

El modelo planteado hace necesario el desarrollo de una metodología para el tratamiento conjunto de la información proporcionada por el modelo geoestadístico y el modelo hidrológico, todo ello dirigido a optimizar los resultados alcanzados en la simulación de la cubierta nival y los caudales derivados de la fusión.

El modelo hidrológico proporciona una información continua del estado de la cubierta nival y los caudales circulantes en el punto de control, mientras que el modelo geoestadístico

permite calcular el estado de la cubierta nival para el día en que se dispone de los datos observados en la campaña nival y la correspondiente fotografía satélite. Por otro lado, la estación el embalse emplazado en el punto de control permite conocer los caudales circulantes por dicho punto. Esto implica que se dispone para la calibración de información del manto nival y de los caudales fluyentes.

Para la calibración del modelo se ha diseñado una metodología de optimización de los parámetros que rigen el comportamiento del modelo hidrológico a partir de los resultados del modelo geoestadístico y los caudales observados en el punto de control (ver fig. 4).

En primer lugar, se propone un ajuste del modelo atendiendo al estudio comparativo entre la distribución espacial del manto nival (espesor y densidad, o su equivalente en columna de agua líquida) calculada por el modelo y la obtenida a partir de las mediciones de campo y la fotografía satélite. Esta optimización se debe realizar considerando la distribución espacio-temporal de la cubierta nival, que para cada cuenca vendrá condicionada por la resolución espacial escogida para del modelo distribuido. Como función objetivo (criterio de optimización) en este caso se ha adoptado la minimización del error cuadrático entre los resultados proporcionados por el modelo hidrológico y el geoestadístico, extendido a todo el modelo distribuido, tal y como queda representado en la siguiente expresión.

$$F_{Objetivo} = \min \sum_{a=1}^f \left( \sum_{i=1}^n (VAFN_i^{M.Simulación} - VAFN_i^{M.Geoestadístico})^2 \right)_n$$

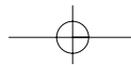
Donde:

$VAFN_i^{M.Simulación}$  - Volumen de agua en forma de nieve obtenido a partir del modelo hidrológico de simulación para la celda i y la fecha a.

$VAFN_i^{M.Geoestadístico}$  - Volumen de agua en forma de nieve obtenido a partir del modelo geoestadístico para la celda i y la fecha a.

n – número de celdas del modelo distribuido que representa la cuenca.

f – Número de fechas para las que se dispone de observaciones del manto nival.



## EL PROGRAMA ERHIN Y LA GESTIÓN DE EMBALSES EN ÁREAS CON ALTA PRECIPITACIÓN NIVAL

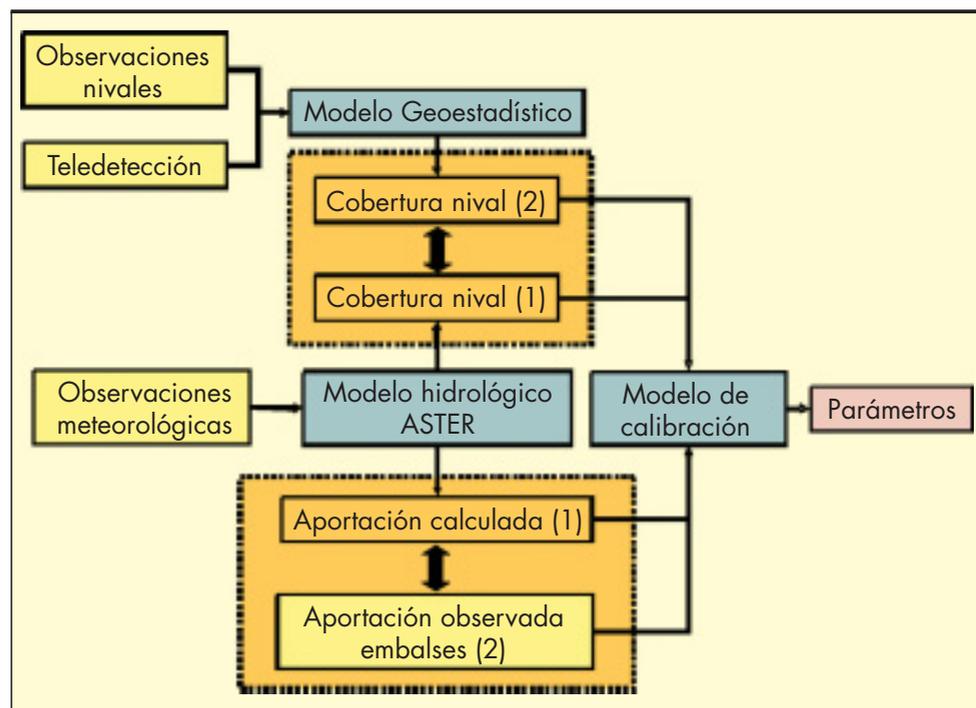


FIGURA 4. Esquema del procedimiento propuesto para realizar el calibrado.

Ajustados los parámetros que condicionan la evolución de la cubierta nival se plantea el estudio comparativo, para la resolución temporal adoptada, entre los caudales fluyentes registrados en el punto de control y los calculados por el modelo hidrológico para el mismo lugar del cauce. En este caso la función objetivo adoptada es la minimización del error cuadrático entre los resultados de caudales observados y calculados, extendida a todo el periodo de simulación incluido en la fase de calibración.

$$F. Objetivo = \min \sum_{i=1}^m (Q_i^{observado} - Q_i^{calculado})^2$$

Donde:

$Q_i^{observado}$  - caudal observado en el punto de control en el instante  $i$ .

$Q_i^{calculado}$  - caudal calculado por el modelo hidrológico en el punto de control en el instante  $i$ .

$m$  - número de instantes para los que se realiza la simulación.

Concluida la fase de calibración, el modelo permite incorporar el estado espacio-temporal de la cubierta nival calculado a partir del modelo geoestadístico para posteriores mediciones (fuera del periodo de simulación) en el modelo hidrológico, para eliminar los posibles errores acumulativos en el cálculo de las reservas hídricas disponibles en forma de nieve.

#### 4.4. CONCLUSIONES

Con el planteamiento realizado se ha conseguido diseñar un modelo nival que permite incluir toda la información disponible referente al dicho fenómeno y que en cada momento podrá ser adaptado a la información disponible y las nuevas técnicas que se desarrollen y apliquen (imágenes satélite obtenidas mediante sensores ópticos, densidades y espesores obtenidos de sensores activos, telenivómetros, etc.).

Esta estructura permite una previsión continua del fenómeno nival (estado del manto nival y escorrentías procedentes de la fusión), así como su calibración a partir en los da-

tos observados (sistemas de información hidrológica, mediciones de campo, telenivómetros, fotografía satélite, etc.), reduciendo al máximo aquellas desviaciones que se pueden producir entre la situación real y la simulada, que en el caso de la nieve son acumulativas.

El modelo también permite la corrección en tiempo real del estado de la cubierta nival calculada a partir de las observaciones realizadas.

Con todo ello, se considera que la metodología propuesta proporciona una información nival precisa y muy útil para ayudar a la gestión de los embalses emplazados en cuencas afectadas por este fenómeno, ya que permite estimar el volumen de agua almacenado en forma de nieve aguas arriba del embalse y la evolución temporal de los caudales fluyentes procedentes de su fusión, variables imprescindibles para el responsable de la explotación.

Por todo ello, en el territorio español, dentro del programa ERHIN se está procediendo a la implantación de esta metodología para ayudar a la gestión de los embalses de cabecera, tanto en situación ordinaria como extraordinaria.

#### 5. EXPERIENCIA EN LAS CUENCAS ESPAÑOLAS

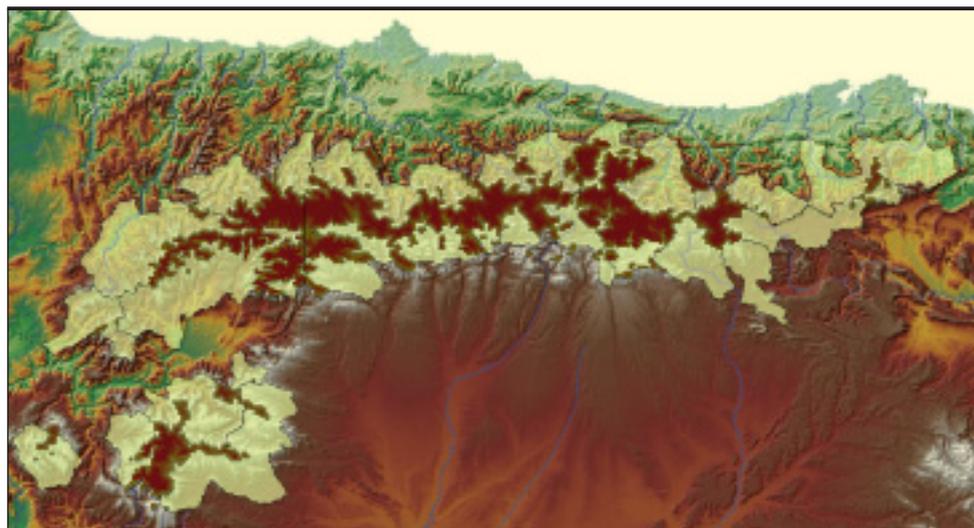
En el territorio español el fenómeno nival, desde el punto de vista de la gestión hídrica tiene relevancia en la cuencas de cabecera de Pirineos, Cordilleras Cantábrica e Ibérica, Sistema Central y Sierra Nevada.

Dentro del programa ERHIN se ha realizado la instalación de una red de control del manto nival que en el Pirineo consta de 113 pértigas instaladas en los años 1986 y 1987 y que cubren una superficie aproximada de 10.000 km<sup>2</sup>, en la Cordillera Cantábrica de 127 pértigas instaladas en los años 1989 y 1990 cubriendo 15.000 km<sup>2</sup>, en Sierra Nevada 24 pértigas instaladas en el año 1990 cubriendo una superficie de 2.600 km<sup>2</sup>, y en el Sistema Central formada por 4 telenivómetros instalados en el año 2.000 par cubrir una superficie de 12.000 km<sup>2</sup>.



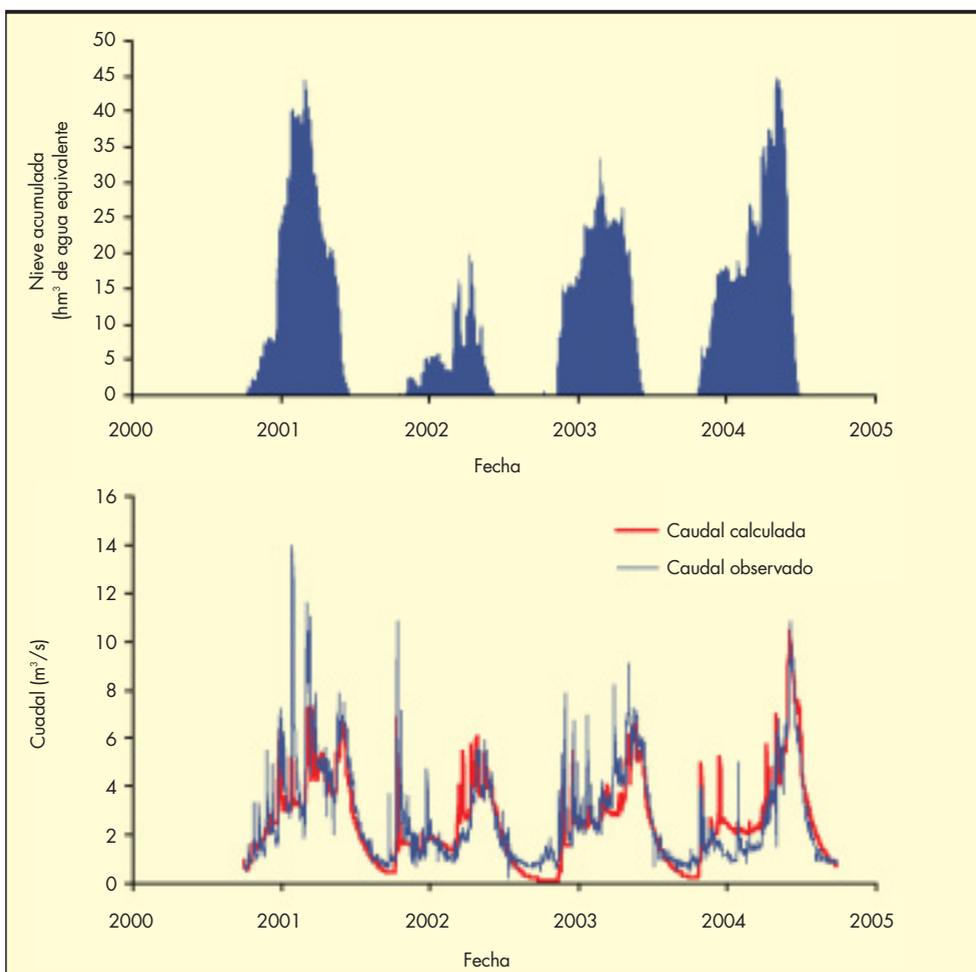
EL PROGRAMA ERHIN Y LA GESTIÓN DE EMBALSES EN ÁREAS CON ALTA PRECIPITACIÓN NIVAL

**FIGURA 5.** Cubierta nival obtenida a partir de imagen satélite para la Cordillera Cantábrica. Fecha: 14-3-2006. La cubierta nival está representada en escala de rojos sobre las cuencas estudiadas dentro del programa ERHIN (en amarillo).

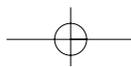


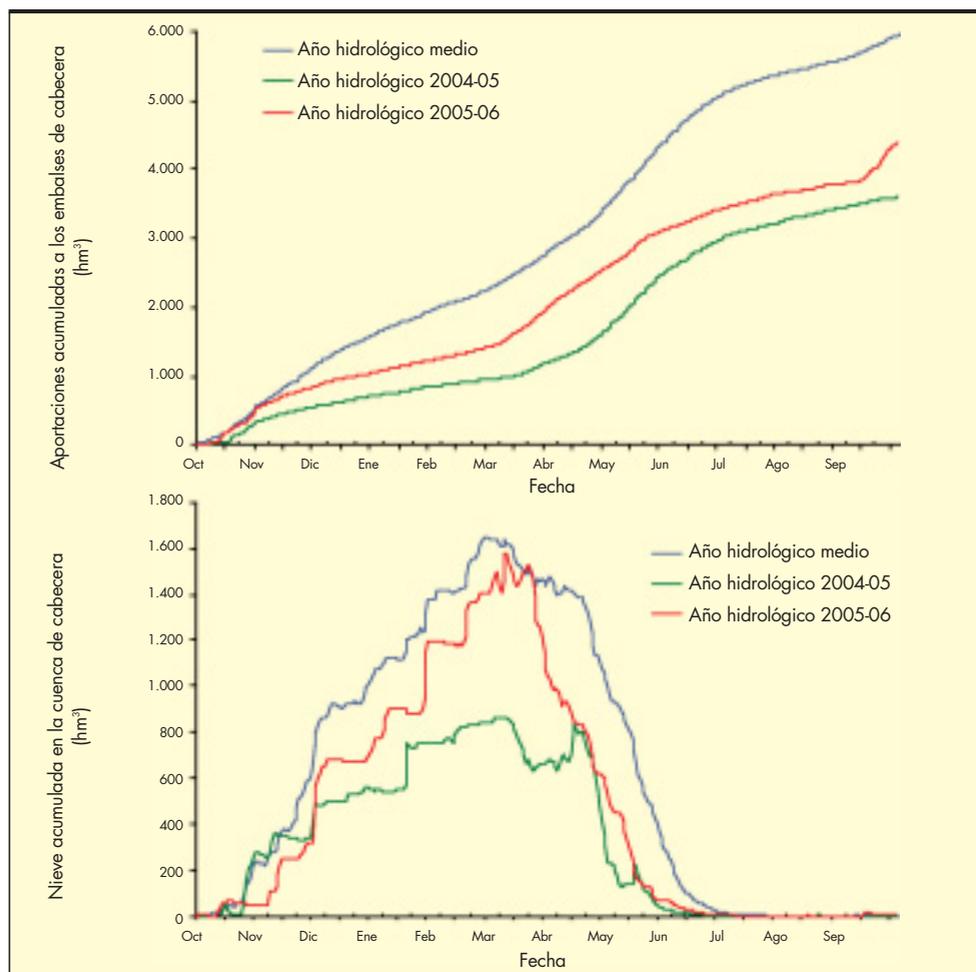
Con posterioridad a la implantación de la red se han realizado del orden de tres mediciones anuales (finales de enero, mediados de marzo y mediados de mayo), incorporando la información a un histórico de registros.

Se han utilizado imágenes satélite para la determinación de la superficie innivada. En este caso se ha analizado de forma detallada la resolución espacial de la imagen a utilizar, que depende principalmente de la variabilidad



**FIGURA 6.** Resultados obtenidos de la aplicación del modelo ASTER para la cuenca del río Genil vertiente al embalse de Canales. Años 2000-2004.




**EL PROGRAMA ERHIN Y LA GESTIÓN DE EMBALSES EN ÁREAS CON ALTA PRECIPITACIÓN NIVAL**


**FIGURA 7.** Evolución del agua acumulada en forma de nieve para las cuencas del Pirineo modelizadas con ASTER, y a aportaciones acumuladas a los embalses de cabecera.

orográfica de la cuenca de estudio y el número de bandas espectrales proporcionadas, que permiten la identificación de la cobertura nival. Para este trabajo las fuentes seleccionadas han sido el sensor MODIS instalado en el satélite Terra/Aqua con una resolución de 250 m y siete bandas espectrales, y el sensor AVHRR instalado en los satélites NOAA con una resolución de 1000 m y cinco bandas espectrales, cuando no se disponía de la imagen anterior (ver fig.5).

Paralelamente se ha utilizado el modelo hidrológico ASTER para la simulación de las principales cuencas nivales vertientes a los embalses de cabecera, utilizando para la calibración de los mismos los datos nivales y los datos hidrológicos, proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología, el Sistema Automático de Información Hidrológica y la Red Oficial de Estaciones de Aforo. En la actualidad se dispone de la modelización del área nival de la cuenca del Ebro, formada por sus 9 subcuencas con cabecera en el Pirineo Español, de la zona nival del río Tajo, compuesta por 12 subcuencas con cabecera en el Sistema Central, de la Cuenca del Guadalquivir (cuenca del río Genil vertiente al embalse de Canales en Sierra Nevada) y se está procediendo a la implantación en la cuenca del Duero (7 subcuencas), proporcionando información esencial para la gestión de 29 embalses. (Ver fig.6)

La metodología aplicada ha demostrado ser adecuada para la modelización del fenómeno nival y por lo tanto ser

de gran utilidad en la gestión de los embalses, tanto en situación ordinaria como en situaciones extremas de avenidas o sequías. Concretamente, en el año 2005 frente a una situación de déficit hídrico en la cuenca del Ebro se aplicó esta metodología para optimizar la gestión de los embalses de cabecera. (ver fig.7)

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Mora J., Ferrer C., Arenillas M., Cobos C. 2004. "Hydrological peculiarities of mountain basins. The case of the Spanish Pyrenees". International conference on water observation and information system for decision support. Macedonia.
- Cobos G. 2004. "Cuantificación de las reservas hídricas en forma de nieve y previsión en tiempo real de los caudales fluyentes derivados de la fusión. Aplicación al Pirineo Español: cuenca alta del río Aragón". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Ferrer, C., Romeo, R., Arenillas, M., Cobos, G. 2002. "El Sistema ASTER-SAIH aplicado a la explotación de embalses en cuencas con marcado comportamiento nival". VII jornadas españolas de presas. Zaragoza.
- Ferrer, C., Cobos G., Martínez R. 1998. "Reservoir management for the control of flood volume in the hidrographical network of the Ebro". Dam Safety. Balkema, Rotterdam.

