

XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SEPTIEMBRE DE 2016

LOS DESAFÍOS DE LA MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA  
Y LA PREVISIÓN DE CRECIDAS EN TIEMPO REAL EN ALTA  
MONTAÑA

*Alain Foehn<sup>1</sup>, Javier García Hernández<sup>2</sup>, Samuel Alesina<sup>2</sup>, Anton J. Schleiss<sup>1</sup>, Javier Fluixá-Sanmartín<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suiza.

<sup>2</sup> Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP). Rue de l'Industrie 45, 1951 Sion, Suiza.

E-mail: [alain.foehn@epfl.ch](mailto:alain.foehn@epfl.ch); [javier.garcia@crealp.vs.ch](mailto:javier.garcia@crealp.vs.ch); [samuel.alesina@crealp.vs.ch](mailto:samuel.alesina@crealp.vs.ch); [anton.schleiss@epfl.ch](mailto:anton.schleiss@epfl.ch); [javier.fluixa@crealp.vs.ch](mailto:javier.fluixa@crealp.vs.ch)

**RESUMEN:**

Los sistemas de previsión de crecidas están considerados hoy en día como un elemento clave en la reducción de riesgos naturales. Su objetivo es explotar la información hidrometeorológica disponible así como los pronósticos meteorológicos para prever los caudales de los ríos con antelación mediante el uso de modelos hidrológicos. La calidad de la previsión hidrológica depende directamente de la calidad de los datos de entrada que alimentan el modelo y su uso óptimo es esencial. En función de las fuentes de datos que se consideran y del método utilizado para espacializar y combinar los mismos, la intensidad y la distribución espacial de los valores extrapolados de precipitación pueden variar considerablemente.

La creación y la calibración del modelo es el siguiente paso importante en la preparación del sistema. La parametrización del modelo se adapta para obtener caudales simulados que se ajusten lo mejor posible a los observados. Por último, al integrar en el esquema de cálculo en tiempo real los caudales y otras observaciones mediante métodos de asimilación de datos, la calidad de la previsión hidrológica se puede mejorar todavía más.

**ABSTRACT:**

Flood forecasting systems are today recognized as a key element in natural hazard mitigation. The objective is to exploit the available observed and forecasted meteorological information to foresee river discharges up to several days in advance, using a hydrological model. The quality of the hydrological forecast is directly dependent on the quality of the meteorological input feeding the model. Optimal usage of the meteorological data is therefore essential. Depending on the sources of data considered and the method used to spatialize and combine the data, the interpolated precipitation intensity and spatial distribution may vary considerably.

Calibration of the model is an important step in the preparation of the system. The parametrization of the model is adapted to obtain simulated discharges as similar as possible to the observed ones. Finally, by integrating in real time discharge and other observations in the computation scheme with data assimilation methods, the quality of the hydrological forecast can be further enhanced.

**PALABRAS CLAVES:** modelización hidrológica; previsión de crecidas; espacialización de datos; calibración; asimilación de datos.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas operacionales de previsión de crecidas se han desarrollado a nivel mundial y hoy en día están considerados como un elemento clave en la gestión y la mitigación de los riesgos naturales, en particular en las regiones de montaña donde las condiciones meteorológicas y las fuertes pendientes del terreno pueden ocasionar crecidas importantes.

El objetivo de estos sistemas de previsión es utilizar la información meteorológica disponible para generar una previsión de caudales en cualquier punto de interés de la cuenca hidrográfica. Las precipitaciones definen el aporte de agua y las temperaturas permiten determinar si la precipitación cae en forma de lluvia o de nieve. Los datos observados en las últimas horas se pueden utilizar para inicializar el modelo, mientras que el último pronóstico meteorológico proporciona los datos de entrada para la simulación de la previsión hidrológica.

Las estaciones meteorológicas son la fuente más común de información, pero suelen ser escasas y se deben utilizar de manera óptima para extraer la información más relevante. Para ello, es conveniente tratar previamente los datos meteorológicos y utilizar otras fuentes de datos si existen, lo cual se aborda en el primer capítulo del presente trabajo. Una vez los datos meteorológicos listos, el desarrollo y la calibración del modelo hidrológico requieren de una correcta comprensión de los procesos y parámetros del modelo. El uso óptimo de los datos disponibles es igualmente esencial; el segundo capítulo trata sobre este tema. Por último, en el tercer capítulo se aborda la integración de los valores obtenidos en tiempo real con el fin de actualizar el modelo. Como caso de estudio, se ha utilizado el sistema MINERVE para la previsión y gestión de crecidas en la cuenca alta del río Ródano, aguas arriba del lago Lemán y principalmente localizada en el Cantón del Valais, en Suiza (García Hernández, 2011; García Hernández et al., 2014; Jordan, 2007).

## ESPACIALIZACIÓN DE LOS DATOS METEOROLÓGICOS

La eficacia de cualquier sistema de previsión de crecidas depende directamente de la calidad de los datos de entrada, en particular de los datos de precipitación y temperatura. Los pluviómetros miden la lluvia en forma líquida y, cuando están equipados con un sistema de calefacción, también la precipitación sólida (generalmente nieve). Éstos proporcionan valores locales más o menos precisos, aunque pueden verse afectados por errores, sobre todo cuando existe viento fuerte (Nešpor and Sevruck, 1999).

En sistemas operacionales, es igualmente importante acceder a los datos de forma rápida y automática. Para ello se deben equipar las estaciones con medios de comunicación que envíen los datos (casi) en tiempo real a un servidor central. Esto supone un costo adicional en las instalaciones, en particular en lo que respecta a la energía requerida por estos equipos que habitualmente no disponen de conexión a la red eléctrica. Además, es necesario elaborar una base de datos para almacenar datos y ponerlos a disposición para los cálculos.

Los datos registrados por las estaciones terrestres de medición son puntuales. Sin embargo, para estimar la precipitación en el conjunto de todo el territorio se debe interpolar dichos datos. A este proceso se le llama espacialización, en el cual se utiliza un esquema de ponderación de los valores medidos para estimar el valor en los puntos no registrados. Se han propuesto muchos métodos en la literatura; Ly et al. (2014) analiza los principales métodos actuales clasificándolos en dos categorías: métodos deterministas y métodos geoestadísticos.

Los métodos deterministas definen un esquema de ponderación de los valores conocidos en función de la distancia entre las estaciones. El método de polígonos de Thiessen, por ejemplo, asigna a cada punto de estimación el valor de la estación más cercana, mientras que el método de ponderación inversa de la distancia utiliza las estaciones adyacentes y calcula el valor de acuerdo a la inversa de la distancia entre los puntos elevada a una potencia  $n$ .

Más recientemente, el uso de los métodos geoestadísticos, incluyendo la técnica de kriging (Matheron, 1971) es cada vez más habitual (Haberlandt, 2007; Sideris et al., 2014; Velasco-Forero et al., 2009). La primera ventaja de estos métodos es el de integrar en el cálculo de la ponderación

no sólo la distancia entre los puntos sino también la correlación entre los valores observados. Otra ventaja es su capacidad de incorporar en el cálculo una fuente de datos adicional; ésta puede ser de naturaleza estática, como la altitud, o dinámica, como la estimación de la precipitación usando radares meteorológicos.

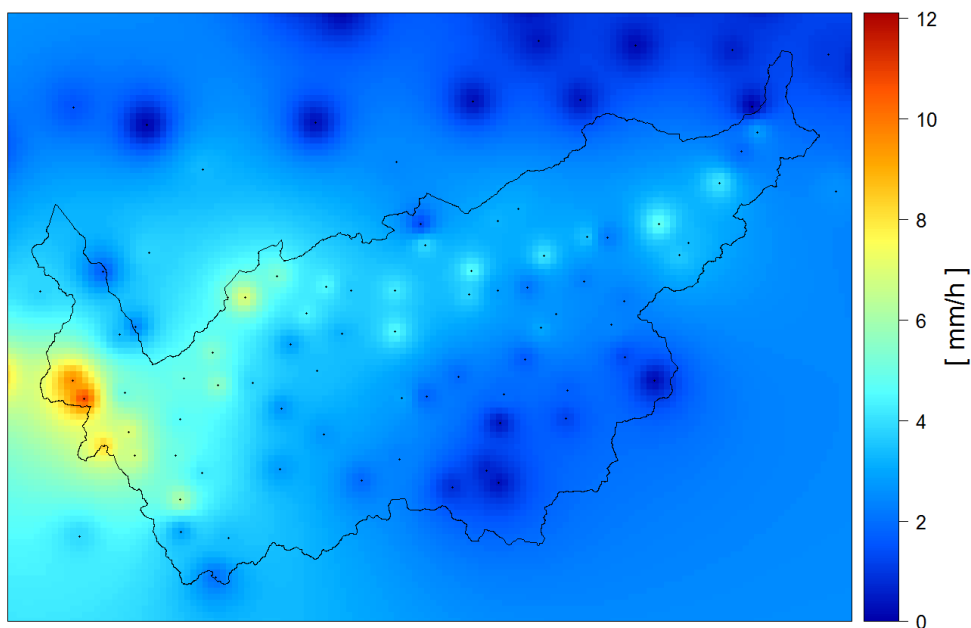
La aplicación de estos métodos se discute más adelante considerando los datos de las estaciones terrestres y de radares meteorológicos. Una tercera fuente de datos interesante, especialmente cuando no se dispone fácilmente de los dos primeros o éstos son de dudosa calidad, son los satelitales (Petty and Krajewski, 1996).

### Datos de las estaciones terrestres de medida

Los datos de las estaciones terrestres de medición se utilizan frecuentemente como dato de entrada en hidrología, en especial dada su relativamente fácil interpretación. Sin embargo, en las regiones con precipitaciones sólidas durante parte del año, es importante que la estación esté equipada con un sistema de calefacción; de lo contrario, no sólo no se puede medir ninguna precipitación durante las nevadas sino que en primavera el agua proveniente de la fusión de la nieve acumulada en la estación se considera como lluvia líquida.

Además, las estaciones de medida están expuestas a numerosas fuentes potenciales de mal funcionamiento y las series de datos a menudo presentan discontinuidades. Esto necesita de un tratamiento para completar los datos faltantes a partir de las medidas de las estaciones circundantes.

La Figura 1 muestra una espacialización de la acumulación horaria de las precipitaciones durante un evento lluvioso observado el 1 de mayo de 2015 (lluvia de 12h a 13h). La ubicación de las estaciones de medición se representa con puntos negros y el contorno del Cantón de Valais se representa con una línea negra.



**Figura 1.-** Espacialización de los datos de estaciones meteorológicas según el método de la ponderación inversa a la distancia al cuadrado – acumulación de precipitaciones el 01.05.2015 de 12h a 13h.

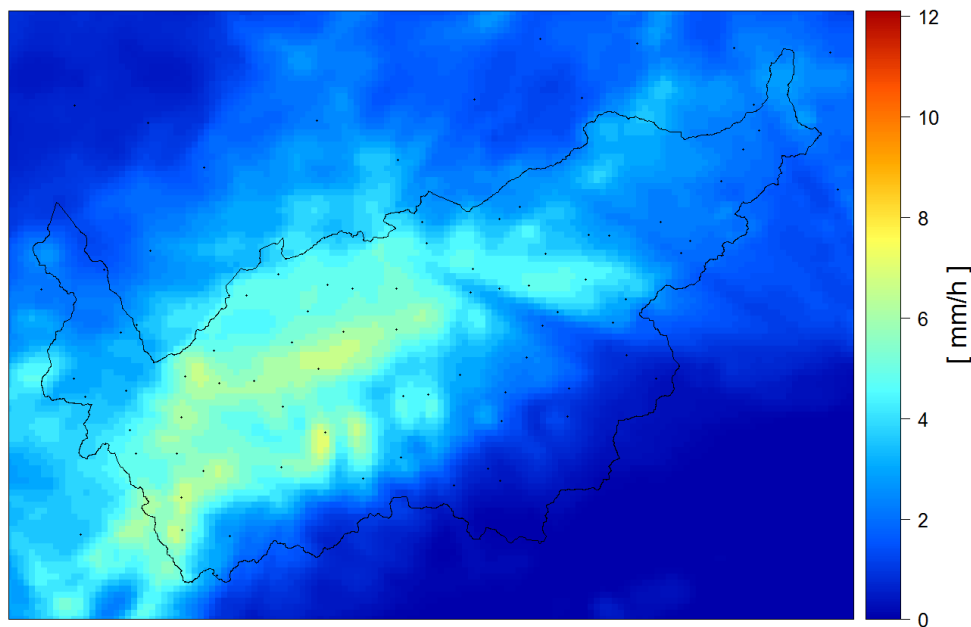
La Figura 1 ilustra bien cómo el método de la ponderación inversa de la distancia permite estimar las precipitaciones correctamente cerca de las estaciones pero más allá de éstas se tiende a un valor medio regional.

Cabe mencionar que actualmente muchos programas de modelización hidrológica incluyen métodos simples de espacialización de datos meteorológicos. En este caso, el trabajo de preparación se limita a validar los datos y eventualmente a completarlos o corregirlos para utilizarlos directamente en dichos programas.

## Datos de los radares meteorológicos

Los radares meteorológicos estiman la precipitación en el conjunto del territorio midiendo el eco de una señal muy corta, generada por el radar y reflejada por el agua de las precipitaciones. Así, estos radares generan mapas de estimación de precipitación que cubren todo el territorio con una resolución típica del orden de 1 a 2 km.

En el caso de Suiza, la Agencia Federal de Meteorología y Climatología *MeteoSwiss* genera, en base a los cinco radares meteorológicos nacionales, mapas de acumulación horaria con una resolución de 1 km (Germann et al., 2006). La Figura 2 muestra la acumulación horaria de precipitación según el radar para el mismo periodo que en la Figura 1 (1 de mayo de 2015 de 12h a 13h). La diferencia entre ambos mapas de precipitación es evidente.

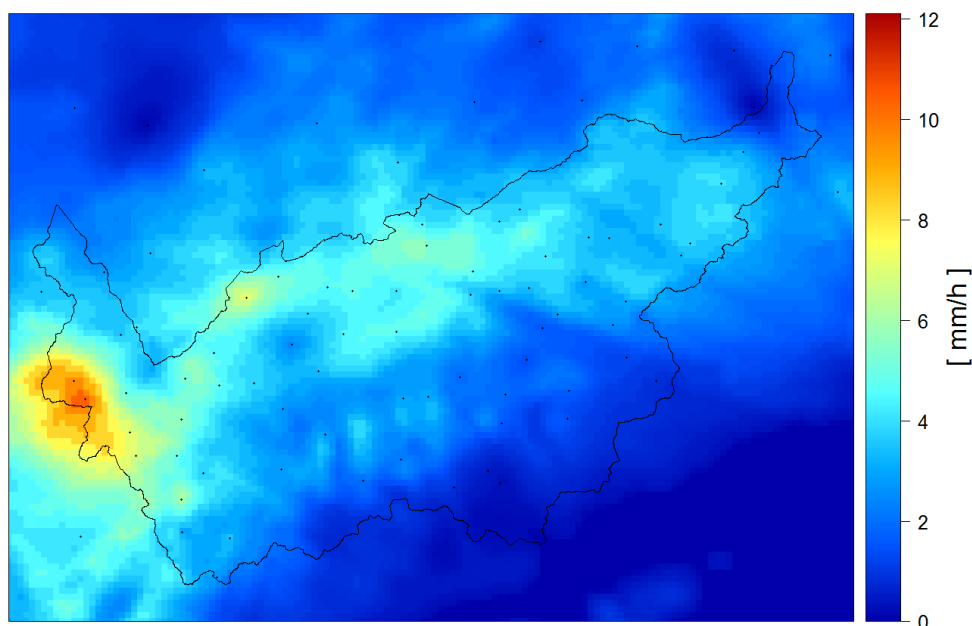


**Figura 2.-** Producto radar de MeteoSwiss - acumulación de las precipitaciones el 01.05.2015 de 12h a 13h.

## Combinación de datos terrestres y datos radar

Sideris et al. (2014) combinó la información de los radares meteorológicos con las observaciones de las estaciones automáticas terrestres de medida de MeteoSwiss para desarrollar el producto *CombiPrecip*, proporcionando a nivel nacional una estimación de las precipitaciones con una resolución espacial de 1 km. La metodología se basa en la técnica de kriging con deriva externa y combina las medidas en el terreno con la estimación de precipitación por radar. La Figura 3 muestra la acumulación horaria proporcionada por el producto *CombiPrecip* para el periodo utilizado en las dos figuras anteriores.

El producto *CombiPrecip* se desarrolló para el conjunto de Suiza. Debido a la compleja topografía del Cantón del Valais, se está desarrollando actualmente una solución más local en el marco del proyecto MINERVE para dicho Cantón. Esto se debe a que, para el cálculo del producto *CombiPrecip*, únicamente se consideran las estaciones de medida de la red nacional *SwissMetNet* de MeteoSwiss. Sin embargo, en el territorio del Cantón del Valais existen otras estaciones meteorológicas de otras redes. Es el caso de las estaciones de la red de la empresa privada MeteoGroup. Los datos de 24 de estas estaciones se utilizarán en la metodología de espacialización actualmente en desarrollo con el objetivo de reducir a nivel local los errores y la incertidumbre. Además, dado que los eventos de lluvia de alta intensidad provienen a menudo del oeste (Francia) o el sur (Italia), se están adquiriendo los datos de las estaciones de las regiones vecinas para reducir las imprecisiones cerca de las fronteras.



**Figura 3.-** Producto *Combiprecip* de MeteoSwiss – acumulación de precipitaciones el 01.05.2015 de 12h a 13h.

Comparando las Figuras 1, 2 y 3, se aprecian claramente las diferencias significativas en los resultados dependiendo de la metodología y la fuente de datos utilizadas, lo que justifica una buena preparación de los datos antes de usarlos como entrada al modelo hidrológico. Se debe prestar atención tanto a la intensidad de las precipitaciones como a su distribución espacial.

## MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA Y CALIBRACIÓN

El modelo hidrológico es la base de cálculo de los sistemas de previsión. Antes de su elaboración, es necesario elegir un modelo adecuado. Es posible clasificar los modelos hidrológicos de varias maneras, por ejemplo en modelos agregados, semi-distribuidos o distribuidos.

Los modelos agregados, basados en un único conjunto de parámetros para toda la superficie, tienen la ventaja de su facilidad de aplicación a costa de un alto grado de simplificación. Los modelos distribuidos, en los cuales la cuenca se divide en una malla regular, y los modelos semi-distribuidos, en los que la cuenca se divide en sub-cuencas, permiten tener en cuenta la variabilidad espacial de los datos meteorológicos y evaluar los parámetros del modelo de manera heterogénea.

Además, los modelos semi-distribuidos tienen la ventaja de poder incorporar fácilmente estructuras hidráulicas tales como centrales hidroeléctricas o de captación para uso agrícola o urbano, lo que permite la modelización tanto de cuencas naturales como de cuencas modificadas por las actividades humanas. Su desventaja radica en el uso de datos matriciales, que requieren un tratamiento preliminar.

En la elección del modelo, el número de parámetros y su complejidad asociada son factores clave. Un modelo más complejo puede no conducir necesariamente a mejores resultados ya que requiere una alta comprensión de su funcionamiento, unos datos de base con una calidad y resolución espacial suficientes para el modelo utilizado, mayor tiempo de calibración e incluso a veces de datos adicionales tales como el tipo de suelo o la radiación solar.

Una vez elegido y elaborado el modelo hay que calibrarlo, es decir parametrizarlo para reproducir lo más fielmente posible los valores observados, que en general son valores de caudal. La calidad de la calibración define la capacidad del modelo para generar hidrogramas fiables y representativos de la realidad.

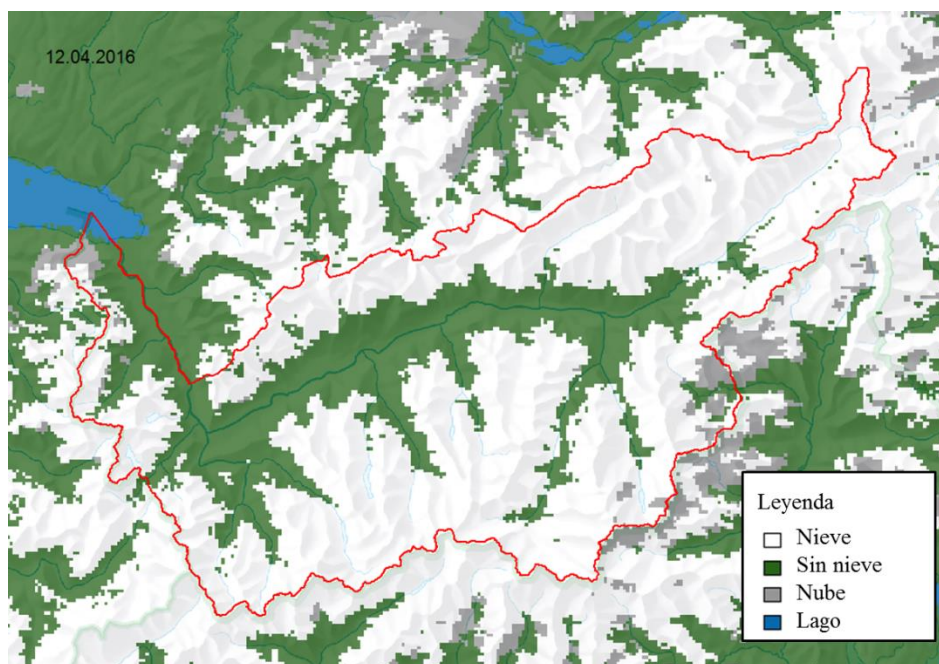
En el marco del proyecto MINERVE, se utiliza el modelo hidrológico semi-distribuido GSM-SOCONT (García Hernández et al., 2016; Schaepli et al., 2005) para modelizar las 1'385 entidades en las que se ha dividido la cuenca, llamadas bandas de altitud. Cada unidad está

representada por un conjunto de parámetros que se ajustan durante la calibración. La elaboración del modelo, su calibración y su uso operacional se realizan mediante el programa RS MINERVE (Foehn et al., 2016; García Hernández et al., 2016).

Dado que la parametrización del modelo está directamente relacionada con los datos de entrada, un cambio importante a este nivel debería dar lugar a una nueva calibración de los parámetros. Por ejemplo, al integrar los datos de nuevas estaciones (lo que modifica considerablemente la configuración de la red utilizada), la calibración del modelo debería revisarse, de lo contrario los resultados podrían empeorar en algunos casos a pesar de contar con nuevos datos, debido a la nueva espacialización/distribución de los datos de entrada.

La calibración puede realizarse de forma manual o automática. En el primer caso, la bondad del modelo se revisa de forma iterativa después de modificar uno o más parámetros y de realizar una nueva simulación. Este procedimiento es poco eficiente y consume mucho tiempo, por lo que se han desarrollado algoritmos de calibración automática tales como el *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA) (Duan et al., 1992, 1993).

Por lo general, todos los parámetros se calibran utilizando los caudales como valor de comparación. Sin embargo, se pueden utilizar otros datos. Así, en el proyecto MINERVE, se está estudiando actualmente la posibilidad de calibrar los parámetros de fusión de nieve del modelo hidrológico, llamado coeficiente de grado-día (Rango and Martinec, 1995), directamente a partir de observaciones de la nieve. Para ello se explotará la estimación de la cobertura de nieve (*Fractionnal snow cover* en Inglés) del radiómetro *MODIS* de los satélites Terra y Aqua (Hall et al., 2006a, 2006b). Este producto proporciona una estimación diaria del porcentaje de cobertura de nieve por píxel de 500 m x 500 m (Figura 4). A partir de un umbral fijado inicialmente en 60%, cada banda de altitud se clasifica diariamente como "con nieve" o "sin nieve" (Figura 4). A partir de esta información y eventualmente utilizando conjuntamente los valores de altura de nieve provenientes de otras fuentes, se estimarán los coeficientes grado-día como primera fase de la calibración.



**Figura 4.-** Estimación de la cobertura de nieve según el producto *MODIS* para el 12 de abril de 2016 como combinación de las imágenes Aqua y Terra, después de su post-tratamiento (© CREALP, 2016).

En una segunda fase, se calibrará el resto de los parámetros en base a los datos de caudales, sin modificar los coeficientes grado-día calibrados previamente. Con este procedimiento se deben tener en cuenta dos problemas adicionales.

El primero es el limitado número de estaciones hidrométricas de medición de caudales. A menudo, éstas sólo cubren una parte de la cuenca y varios valles comparten un único punto de

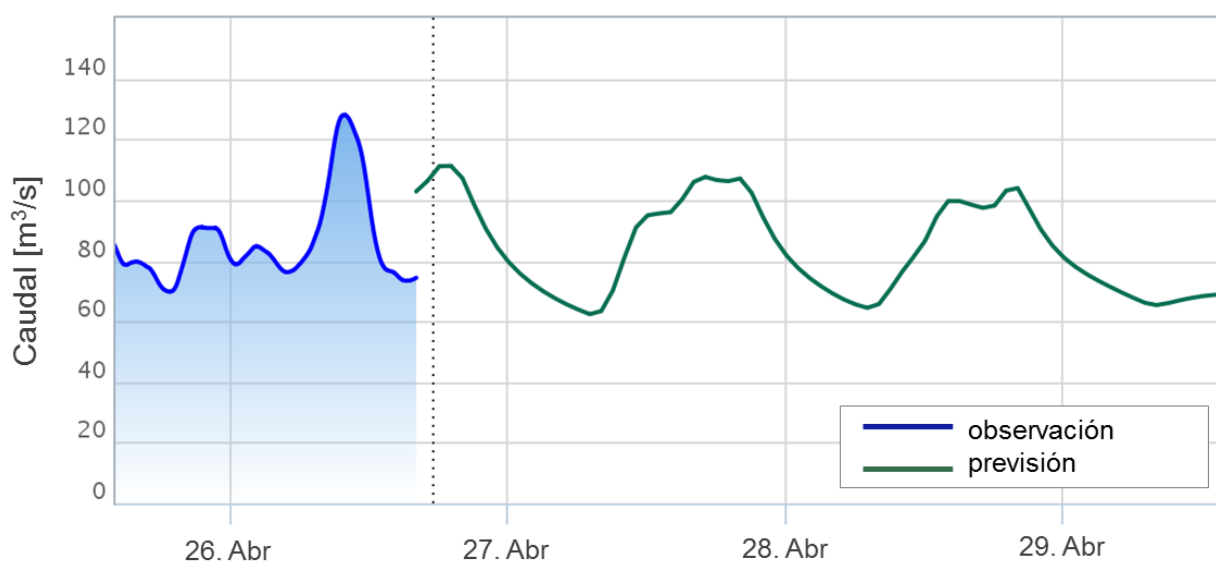
medición. Cuando un valle está equipado con estaciones pero los valles adyacentes no lo están, se puede llevar a cabo una regionalización, aplicando los valores de los parámetros del valle equipado a los demás valles.

La segunda dificultad es la presencia de gran cantidad de centrales hidroeléctricas. A modo de ejemplo, dentro de la cuenca del río Ródano la presa de la Grande Dixence representa el mayor embalse con 400 millones de m<sup>3</sup>. Obviamente, esto altera de forma notable los caudales aguas abajo y, al no poder acceder a las informaciones reales de turbinado, a menudo es difícil para el(la) hidrólogo(a) calibrar adecuadamente el modelo.

## ASIMILACIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL

En el sistema MINERVE actual, las condiciones iniciales de cada previsión hidrológica se calculan mediante una simulación que utiliza los datos observados de precipitación y temperatura, y que se denomina simulación de control. Para ello se actualiza la simulación histórica con los últimos datos observados hasta el momento en el que está disponible la previsión meteorológica. Esto permite inicializar el modelo correctamente.

Los datos observados también representan un gran potencial para la fase operativa del modelo. En efecto, teniendo en cuenta valores tales como el caudal observado en tiempo real o el equivalente en agua de la nieve, las variables de estado del modelo se pueden actualizar permitiendo asimilar el modelo a la realidad. Como se muestra en la Figura 5, si no se hace ninguna corrección inicial, pueden existir desfases entre el caudal medido y el simulado al inicio de una previsión hidrológica. Parte de esta diferencia se debe al error intrínseco del modelo debido a la simplificación de la realidad en la modelización. No obstante, otra parte del error puede estar vinculada a una desviación debida a las variables de estado (como por ejemplo la saturación en agua del suelo), y una actualización de éstas podría reducir la diferencia observada.



**Figura 5.-** Desfase entre el caudal observado y el simulado al inicio de la previsión hidrológica (© CREALP, 2016).

Existen varias técnicas para implementar este tipo de soluciones, variando su complejidad significativamente. Entre los métodos relativamente simples se pueden citar la variación de las condiciones iniciales para la simulación de control mediante un factor multiplicador. Tras haber simulado el modelo con las diferentes condiciones iniciales, se retienen aquellas que proporcionan una menor diferencia entre el volumen de agua simulado y el volumen observado en el periodo de control.

El uso de otros métodos más complejos, como el *Ensemble Kalman Filter* (Evensen, 1994, 2003) se ha vuelto frecuente en hidrología. Liu et al. (2012) ofrecen una revisión detallada del estado del arte tanto en términos de investigación hidrológica como desde un punto de vista operacional.

Cabe recordar que, incluso aplicando todo lo anterior, la previsión hidrológica nunca podrá corresponder perfectamente a la realidad. Además de las muchas simplificaciones y las posibles fuentes de error debidas a la modelización, la previsión meteorológica proviene ella misma de los resultados de un modelo matemático simplificado, lo que implica un cierto número de hipótesis y de fuentes de incertidumbre.

## CONCLUSIÓN

La modelización hidrológica supone siempre un reto importante, pero cuando se aplica en un entorno alpino, el trabajo resulta a menudo más complejo. Una buena estimación de la precipitación es generalmente un objetivo importante. Por un lado, las estaciones terrestres normalmente cubren sólo una parte del territorio y con una densidad menor de la que se esperaría. Por otro lado, la combinación de diferentes fuentes de datos puede ser compleja y, dependiendo del método de espacialización que se utilice, la distribución espacial de las precipitaciones puede variar significativamente.

Tras haber elaborado el modelo hidrológico, la calibración permite definir la parametrización óptima que genere caudales simulados lo más similares posible a los caudales observados. Esto se realiza generalmente en base a los datos de caudal, aunque se pueden utilizar otras observaciones para calibrar de forma independiente algunos de los parámetros.

Asimismo, los datos observados pueden ser utilizados para actualizar las variables de estado (condiciones iniciales) del modelo hidrológico. Con un método de asimilación de datos se pueden utilizar los registros de caudal, de equivalente en agua de nieve o de cualquier otra medida pertinente, para corregir las condiciones iniciales del modelo hidrológico y permitir así una mejora general en la bondad de las previsiones hidrológicas. La calidad de estas últimas sigue dependiendo sin embargo de la calidad de la previsión meteorológica.

A pesar de las dificultades antes mencionadas, la modelización hidrológica es una herramienta muy valiosa para la previsión de crecidas en medio alpino y permite a día de hoy pronosticar de forma relativamente correcta los caudales con una anticipación de varios días u horas. Esto conduce a una mejor gestión de los riesgos naturales y por tanto una mayor seguridad para las personas y las infraestructuras.

## AGRADECIMIENTOS

El proyecto de investigación en el cual se basa el presente trabajo, realizado en la École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), está financiado por el Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP). Agradecemos su apoyo a los participantes del proyecto: el Cantón del Valais, la Agencia Federal de Meteorología y Climatología MeteoSwiss, la Universitat Politècnica de València (UPV) y el estudio de ingeniería HydroCosmos SA.

Agradecemos también la colaboración a los proveedores de datos. Los datos de las estaciones meteorológicas utilizadas en el proyecto provienen de la red SwissMetNet de MeteoSwiss, de la red cantonal del Cantón de Berna, de la red de la sociedad MeteoGroup Schweiz AG y de la red nacional francesa de MétéoFrance. Los datos radar y el producto Combiprecip han sido suministrados por MeteoSwiss. Los datos de las estaciones hidrométricas provienen de las redes de la Agencia Federal Suiza del Medio Ambiente y del Cantón del Valais.



## REFERENCIAS

- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.** (1992). “*Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models*”. *Water Resources Research*, 28(4). 1015–1031. ISSN 00431397. doi: 10.1029/91WR02985.
- Duan, Q. Y., Gupta, V. K. and Sorooshian, S.** (1993). “*Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization*”. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76(3). 501–521. ISSN 0022-3239, 1573-2878. doi: 10.1007/BF00939380.
- Evensen, G.** (1994). “*Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics*”. *Journal of Geophysical Research*, 99(C5). 10143. ISSN 0148-0227. doi: 10.1029/94JC00572.
- Evensen, G.** (2003). “*The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation*”. *Ocean Dynamics*, 53(4). 343–367. ISSN 1616-7341, 1616-7228. doi: 10.1007/s10236-003-0036-9.
- Foehn, A., García Hernández, J., Roquier, B. and Paredes Arquiola, J.** (2016). “*RS MINERVE – User’s manual v2.3*”, RS MINERVE Group, Switzerland, 115p.
- García Hernández, J.** (2011). “*Flood management in a complex river basin with a real-time decision support system based on hydrological forecasts*”, Communication 48 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ed. A. Schleiss, EPFL, Lausanne.
- García Hernández, J., Claude, A., Paredes Arquiola, J., Roquier, B. and Boillat, J.** (2014). “*Integrated flood forecasting and management system in a complex catchment area in the Alps—implementation of the MINERVE project in the Canton of Valais*”, in *Swiss Competences in River Engineering and Restoration*, edited by A. Schleiss, J. Speerli, and R. Pfammatter, pp. 87–97, CRC Press, ISBN 978-1-138-02676-6.
- García Hernández, J., Paredes Arquiola, J., Foehn, A. and Roquier, B.** (2016). “*RS MINERVE – Technical manual v2.3*”, RS MINERVE Group, Switzerland, 130p.
- Germann, U., Galli, G., Boscacci, M. and Bolliger, M.** (2006). “*Radar precipitation measurement in a mountainous region*”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(618). 1669–1692. ISSN 00359009, 1477870X. doi: 10.1256/qj.05.190.
- Haberlandt, U.** (2007). “*Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event*”. *Journal of Hydrology*, 332(1-2). 144–157. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.06.028.
- Hall, D., Salomonson, V. and Riggs, G.** (2006a). “*MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 5*”. doi: 10.5067/63NQRSRDPDB0.
- Hall, D., Salomonson, V. and Riggs, G.** (2006b). “*MODIS/Aqua Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 5*”. doi: 10.5067/ZFAEMQGSR4XD.
- 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*”, Communication 29 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ed. A. Schleiss, EPFL, Lausanne.
- Liu, Y., Weerts, A. H., Clark, M., Hendricks Franssen, H.-J., Kumar, S., Moradkhani, H., Seo, D.-J., Schwanenberg, D., Smith, P., van Dijk, A. I. J. M., van Velzen, N., He, M., Lee, H., Noh, S. J., Rakovec, O. and Restrepo, P.** (2012). “*Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities*”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(10). 3863–3887. ISSN 1607-7938. doi: 10.5194/hess-16-3863-2012.
- Ly, S., Charles, C. and Degre, A.** (2014). “*Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale. A review.*”, [online] Available from: <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1225842> (Accessed 29 November 2015)
- Matheron, G.** (1971). “*The theory of regionalized variables and its applications*”. Paris : École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

- Nešpor, V. and Sevruk, B.** (1999). “*Estimation of wind-induced error of rainfall gauge measurements using a numerical simulation*”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(4). 450–464. ISSN 0739-0572, 1520-0426. doi: 10.1175/1520-0426(1999)016<0450:EOWIEO>2.0.CO;2.
- Petty, G. W. and Krajewski, W. F.** (1996). “*Satellite estimation of precipitation over land*”. *Hydrological Sciences Journal*, 41(4). 433–451. ISSN 0262-6667, 2150-3435. doi: 10.1080/02626669609491519.
- Rango, A. and Martinec, J.** (1995). “*Revisiting the degree-day method for snowmelt computations*”. *Journal of the American Water Resources Association*, 31(4). 657–669. ISSN 1093-474X, 1752-1688. doi: 10.1111/j.1752-1688.1995.tb03392.x.
- Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M. and Musy, A.** (2005). “*A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments*”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(1/2). 95–109. ISSN 1607-7938. doi: 10.5194/hess-9-95-2005.
- Sideris, I. V., Gabella, M., Erdin, R. and Germann, U.** (2014). “*Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland: Real-time radar-rain-gauge merging*”. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(680). 1097–1111. ISSN 00359009. doi: 10.1002/qj.2188.
- Velasco-Forero, C. A., Sempere-Torres, D., Cassiraga, E. F. and Jaime Gómez-Hernández, J.** (2009). “*A non-parametric automatic blending methodology to estimate rainfall fields from rain gauge and radar data*”. *Advances in Water Resources*, 32(7). 986–1002. ISSN 03091708. doi: 10.1016/j.advwatres.2008.10.004.