

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

**EL SISTEMA OPERACIONAL MINERVE PARA LA PREVISIÓN DE
CRECIDAS EN EL CANTÓN DE VALAIS, SUIZA**

Javier García Hernández¹, Alain Foehn², Samuel Alesina¹, Javier Fluixá-Sanmartín¹

¹ Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP), Sion, SUIZA. Tel.: +41 27 607 11 80.

² École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, SUIZA. Tel.: +41 21 693 53 94.

E-mail: javier.garcia@crealp.vs.ch; alain.foehn@epfl.ch; samuel.alesina@crealp.vs.ch; javier.fluixa@crealp.vs.ch

RESUMEN:

Durante las últimas 4 décadas, la cuenca vertiente del río Ródano, aguas arriba del lago Lemán en Suiza, ha sufrido tres grandes crecidas que han causado daños superiores a los 1000 millones de dólares. Así nació la tercera corrección del río Ródano, cuyo objetivo es mejorar la protección contra las crecidas en dicha cuenca.

En este marco, el sistema de previsión y gestión de crecidas MINERVE busca mejorar la información hidrometeorológica durante las crecidas en la cuenca teniendo en cuenta la red de embalses y centrales hidroeléctricas existentes. La primera fase del proyecto empezó en 2002, con diversos proyectos de investigación aplicada que buscaban el desarrollo de un modelo hidrológico-hidráulico capaz de modelizar cuencas complejas de manera rápida y sencilla. A continuación, dichas investigaciones se pusieron en fase operacional en 2011 para proporcionar un sistema operacional en tiempo real para la previsión y la gestión de crecidas en el río Ródano.

ABSTRACT:

In recent decades, the watershed of the Rhône River, upstream of Lake Geneva in Switzerland, has suffered three major floods that have caused damages for over 500 million dollars. This led to the third correction of the Rhône River, which aims to improve flood protection in the basin.

In this context, the MINERVE system for forecasting and flood management aims to improve the hydrometeorological information in the basin taking into account the existing network of reservoirs and hydropower plants. The first phase of the project began in 2002 with various applied research projects aiming to develop a hydrological and hydraulic model capable of quickly and easily modeling complex basins. Then, these investigations were put into operational phase in 2011 to provide a real-time operating system for flood forecasting and management in the Rhone River.

PALABRAS CLAVES: modelización hidrológica e hidráulica; previsión de crecidas; Ródano

INTRODUCCIÓN

Contexto y objetivos del sistema MINERVE

Las regiones alpinas están particularmente expuestas a precipitaciones extremas, y su acusada topografía incrementa su vulnerabilidad frente a crecidas (Verbunt et al., 2006). En las últimas décadas en Suiza, estos eventos extremos se producen con mayor frecuencia, aumentando así la necesidad de sistemas de previsión fiables que mitiguen sus efectos (Peña et al., 2015).

El Cantón del Valais, situado al sur de Suiza, sufrió una grave crecida en octubre de 2000, lo que supuso un coste total estimado de casi 500 millones de francos suizos (alrededor de 511 millones de dólares americanos). Esto confirmó la necesidad de implementar la tercera corrección del río Ródano, que se llevará a cabo a lo largo de los próximos 20 años. Su objetivo principal es el de aumentar la protección de la población y las infraestructuras, mejorando a su vez los aspectos medioambientales y sociales del río Ródano.

En el contexto del proyecto MINERVE (*Modélisation des Intempéries de Nature Extrême dans le Rhône Valaisan et de leur Effets*) que forma parte de la tercera corrección del río Ródano, el Cantón del Valais decidió crear en 2011 un departamento de gestión de crecidas en el Centro de Investigación del Medio Alpino (CREALP), una fundación privada sin ánimo de lucro ubicada en Sion y dedicada a la investigación aplicada en el campo de los riesgos naturales. Su misión era la de implementar y explotar de forma operativa el sistema de previsiones MINERVE.

Los objetivos principales del proyecto son el establecimiento de un sistema capaz de proporcionar previsiones hidrológicas, proporcionar las advertencias por crecidas en tiempo real y, por último, implementar un sistema interactivo de ayuda a la decisión (Decision Support System) para la optimización y la gestión de crecidas en tiempo real gracias a las operaciones de las centrales hidroeléctricas.

Con esto se busca alcanzar un mayor control de los caudales durante los eventos de crecidas en la cuenca alta del Ródano (Bérod, 2013; García Hernández, 2011a, 2011b; García Hernández et al., 2009, 2014; Jordan, 2007; Jordan et al., 2008, 2010).

Programa de modelización hidrológica e hidráulica

Para desarrollar los objetivos presentados previamente, el CREALP empezó a desarrollar en 2011 y en colaboración con HydroCosmos SA, la École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), la Universitat Politècnica de València (UPV) y la Asociación Hydro10, el programa RS MINERVE de simulación hidrológica e hidráulica. Entre las principales características de la versión 2.0, disponible desde 2015, destacan las siguientes:

- Construcción de un modelo hidrológico completo a partir de capas vectoriales (SIG).
- Modelización de redes hidrológico-hidráulicas complejas siguiendo un enfoque semi-distribuido.
- Simulación de la formación y propagación de caudales considerando procesos naturales tales como la fusión glaciar y nival, la infiltración o la escorrentía superficial.
- Integración de embalses y elementos de control hidráulicos como compuertas, derivaciones, turbinados, etc.
- Posibilidad de trabajar en línea de comando usando Visual Basic Scripts (VBScripts), lo que permite la automatización operacional de las simulaciones hidrológicas.

ÁREA DE ESTUDIO: LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÓDANO

La cuenca vertiente superior del río Ródano (**Figura 1**) se encuentra en los Alpes suizos en una zona montañosa con una importante presencia de glaciares y comprende la mayor parte del Cantón de Valais y una parte del Cantón de Vaud. La superficie de la cuenca es de 5524 km², incluyendo 658 km² de glaciares, y su elevación varía entre 372 y 4634 m s.n.m.

La longitud total del río Ródano, desde su nacimiento en el Glaciar del Ródano hasta el lago Lemán, es de 165 km. El caudal medio registrado en esta cuenca, en su punto de desagüe, durante los últimos 25 años, ha sido de 189 m³/s, y el pico de caudal más alto de 1358 m³/s medido el 15 de octubre del año 2000.

El régimen hidrológico de la cuenca está regulado por más de 10 grandes embalses (cuya capacidad de almacenamiento conjunta alcanza los 1195 millones de m³) y con multitud de centrales hidroeléctricas con una capacidad total para turbinar más de 500 m³/s.

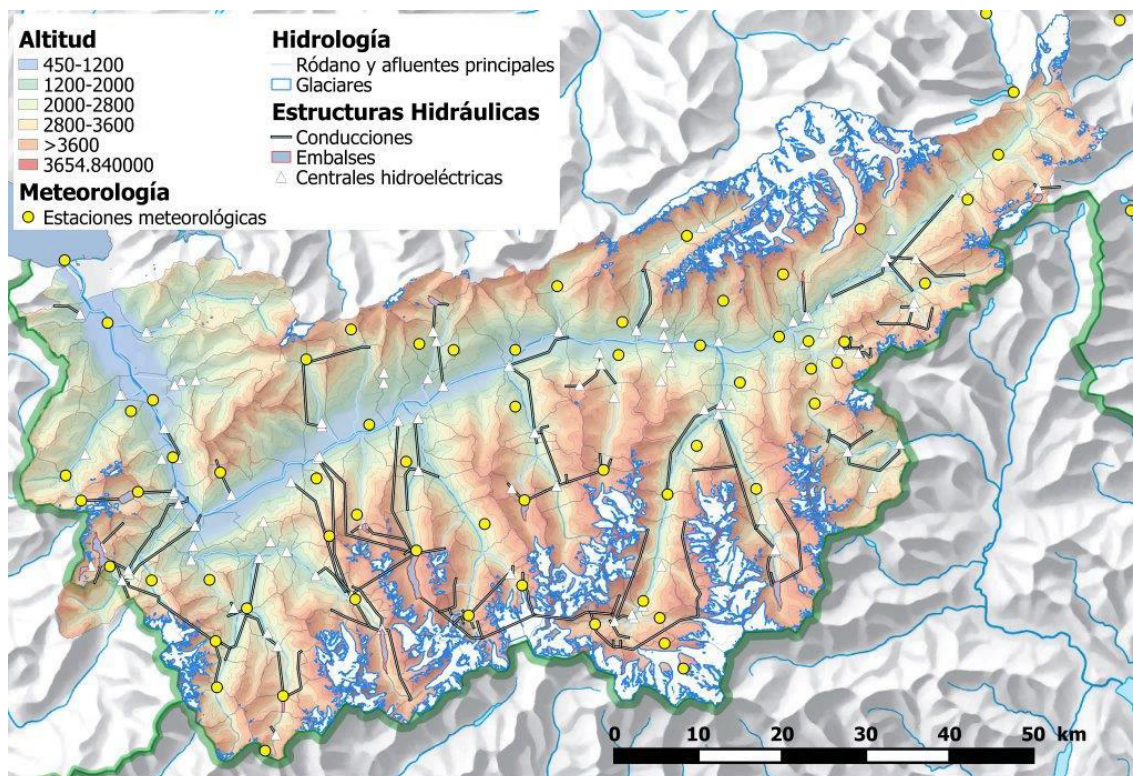


Figura 1.- Cuenca vertiente del río Ródano aguas arriba del lago Lemán, Cantón del Valais, Suiza.

MODELO HIDROLÓGICO

Un elemento fundamental del sistema MINERVE es el modelo hidrológico-hidráulico de la cuenca, que permite la simulación de caudales a partir de información meteorológica obtenida en tiempo real.

Discretización y esquematización de la cuenca

La modelización hidrológica efectuada sigue un enfoque semi-distribuido que tiene en cuenta la división de la cuenca en subcuencas y su posterior subdivisión en bandas de altitud.

A partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) y teniendo en cuenta la ubicación de las estaciones de aforo, embalses, centrales hidroeléctricas y tomas de agua, así como las confluencias de los ríos, se dividió la cuenca en un total de 245 subcuencas. Además, para describir correctamente los procesos hidrológicos relacionados con la temperatura tales como la fusión de nieve o de glaciares en función de la altura, a dichas subcuencas se les aplicó una nueva subdivisión en bandas de altitud: se crearon así un total de 1347 bandas distribuidas entre no-glaciares (1027) y glaciares (320), como se muestra en la **Figura 2**.

El esquema conceptual realizado tiene también en cuenta 22 tramos de río para el Ródano, y 141 tramos adicionales para los afluentes. Finalmente, los embalses de retención más relevantes (14), los embalses de compensación (13), las centrales hidroeléctricas (31) y las tomas de agua (91) se incluyeron en el mismo esquema.

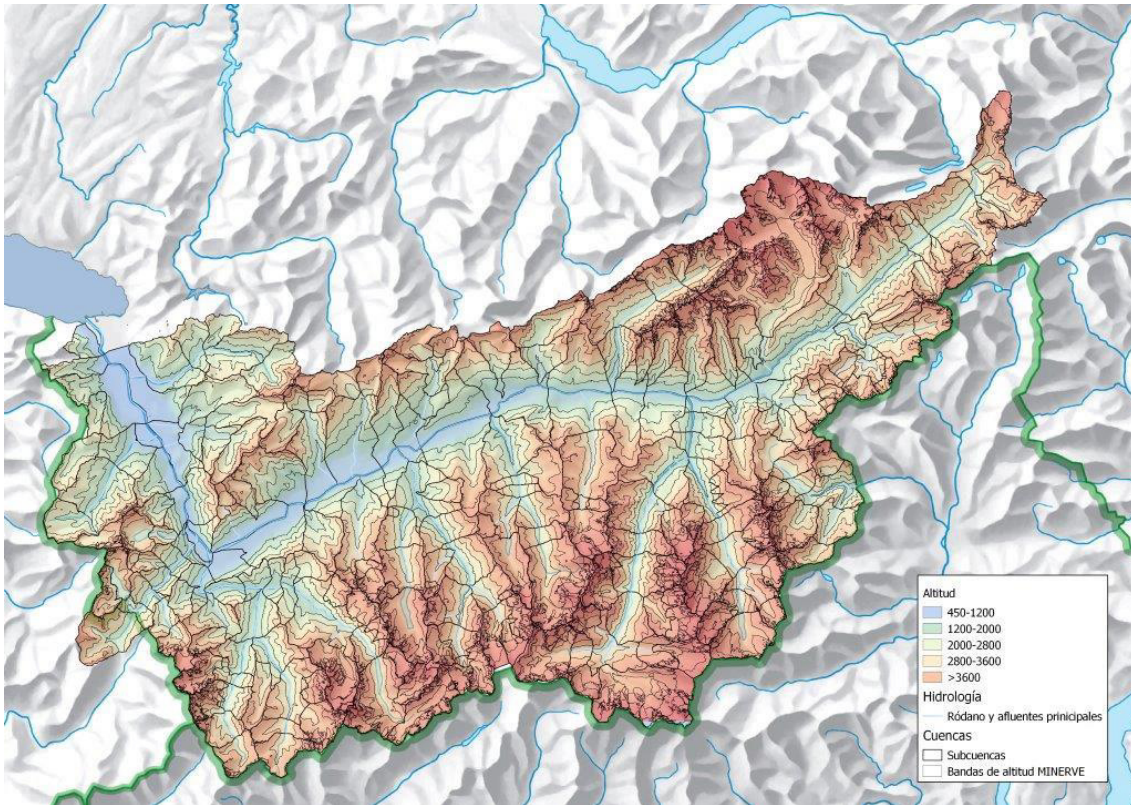


Figura 2.- División de la cuenca del río Ródano en 245 subcuencas y 1347 bandas de altitud.

Bases de la modelización hidrológico-hidráulica

La modelización de la cuenca se ha llevado a cabo con el programa RS MINERVE (Foehn et al., 2016; García Hernández et al., 2016), el cual integra de forma sencilla los procesos hidrológicos, hidráulicos y operacionales. El modelo de la cuenca del río Ródano incluye 2 tipos de modelos hidrológicos:

- El modelo GSM (Glacier and SnowMelt), diseñado por Schäfli et al. (2005) calcula la fusión nival y glaciar a partir de un enfoque grado-día.
- El modelo SOCONT (Soil Contribution), que incluye un modelo de nieve, un modelo GR3 (Michel and Edijatno 1988; Consuegra et al. 1998) para la infiltración, y un modelo SWMM (Storm Water Management Model) para la escorrentía (Metcalf and Eddy, 1971).

Además, se disponen de otros modelos hidrológicos como el HBV (Bergström 1976, 1992) que calcula tanto procesos nivales como escorrentías e infiltraciones; el GR4J (Perrin et al. 2003) que simula el caudal generado en los tanques de producción y almacenamiento basándose en hidrogramas unitarios; y finalmente el SAC-SMA (Sacramento Soil Moisture Accounting Model) que calcula la escorrentía y el flujo base basándose en las características de percolación del suelo (Burnash et al. 1973; Burnash 1995).

Los tramos de río se modelizaron y resolvieron con elementos “Kinematic River” (“Río cinemático”), aunque el programa permite recurrir a otros métodos de cálculo, como la resolución por Muskigum-Cunge o por Saint-Venant.

Todos los elementos artificiales, tales como los embalses o centrales hidroeléctricas también fueron directamente incluidos en la modelización según el SIG de referencia, localizando correctamente las entradas y las salidas de cada elemento, así como su localización.

En base a todo lo mencionado, se pudo construir el modelo hidrológico-hidráulico de la cuenca alta del Ródano. En la **Figura 3** se muestra un ejemplo de modelización de una parte de la cuenca (zona Grande Eau) con elementos GSM y SOCONT para cada una de las bandas de altitud glaciares y no-glaciares, así como con elementos “Kinematic River” para los tramos de río. Los caudales generados se recogen en las confluencias con los elementos “Junction”.

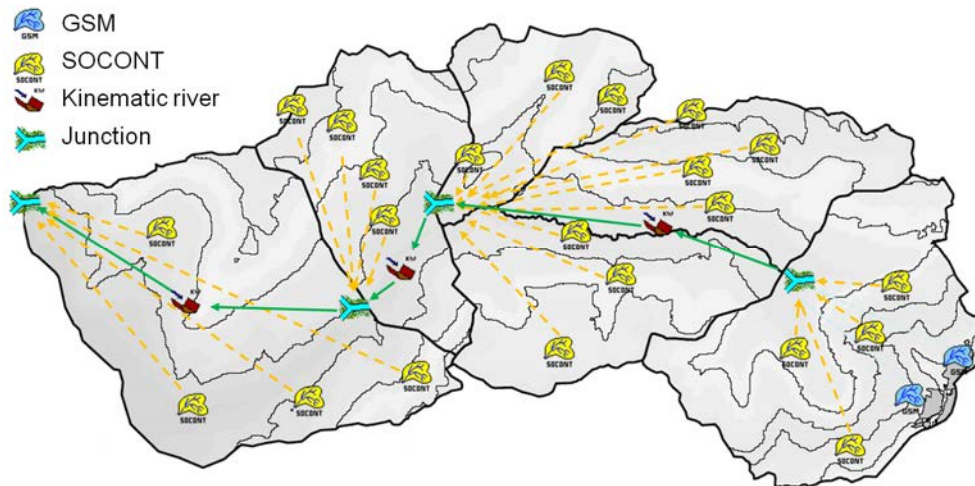


Figura 3.- Subcuencas y bandas de altitud de la zona Grande Eau (parte baja de la cuenca del Ródano) y la representación esquemática de las bandas glaciares (GSM) y no-glaciares (SOCONT), ríos y confluencias.

Para el proceso de calibración del modelo se utilizaron los datos meteorológicos observados y diferentes algoritmos matemáticos para el cálculo del mejor juego de parámetros hidrológicos. En el modo operacional, las observaciones meteorológicas sirven de base para la simulación y actualización de las condiciones iniciales de la cuenca (p. ej. saturación del suelo), y las previsiones meteorológicas a su vez se utilizan para las simulaciones de previsiones hidrológicas.

Datos disponibles

Los datos meteorológicos observados y utilizados son suministrados por la red MeteoSwiss (70 estaciones), con paso de tiempo de 10 minutos y proporcionando información de precipitación (P), temperatura (T), viento (V) o humedad relativa (HR). Otras redes de datos suplementarias, como de la SLF (60 estaciones), que suministra datos de P, T, V, HR y altura de nieve, está en curso de integración y podrá mejorar la gran variabilidad meteorológica existente debido al relieve tan marcado.

Para las previsiones meteorológicas se dispone del modelo COSMO-7, con una resolución espacial de 6.6 km, una resolución temporal de 1h y un horizonte de 72 horas. Dicha previsión se actualiza 3 veces al día (00:00, 06:00 y 1:h00 UTC). Actualmente se suministran al modelo hidrológico únicamente los datos meteorológicos de P y T. Para la Evapotranspiración Potencial (ETP) se dispone de varios métodos implementados en RS MINERVE: Turc (1955, 1961), actualmente utilizado para el cálculo operacional, McGuinness and Bordne (1972) y Oudin (2004).

Para calcular la cobertura de nieve se utilizan los datos provenientes de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), de la NASA, que permiten calcular la extensión de la nieve observada y su evolución (Dionisio Calado et al. 2014). Ello permite posteriormente actualizar la cobertura nival considerada en el modelo hidrológico. La información de MODIS tiene una resolución espacial de 500 m y una actualización diaria, aunque con un retraso promedio de 2 o 3 días; además está disponible de forma gratuita en la web del National Snow and Ice Data Center.

Las estaciones de aforo para la obtención del caudal están gestionadas principalmente por la Oficina Federal del Medio Ambiente de Suiza (OFEN). Se dispone de datos en 17 estaciones desde hace más de 30 años, que actualmente suministran registros en tiempo real cada 10 minutos o 1 hora, dependiendo de la estación. Adicionalmente, desde 2013 existen 6 estaciones de medida de niveles de agua en tiempo real en algunos afluentes del Ródano, gestionadas por el Cantón de Valais. Otras estaciones de medida de niveles de agua están en curso de instalación, lo que permitirá mejorar el rendimiento y la robustez del sistema de previsión, en particular en los valles laterales.

Los datos de nivel de embalses y operaciones en las centrales hidroeléctricas también se obtienen parcialmente y permiten la validación de las operaciones hidráulicas del modelo.

SISTEMA OPERACIONAL

Esquema operacional

El sistema MINERVE (**Figura 4**) para la predicción de crecidas en tiempo real se compone principalmente de:

- Una base de datos para la adquisición y almacenamiento de datos hidrometeorológicos y su gestión/utilización en tiempo real.
- El programa RS MINERVE para la simulación hidrológica e hidráulica automática, instalado en un servidor independiente y también accesible en todo momento.
- Una plataforma web de información donde se pueden consultar las observaciones y los pronósticos mediante gráficos y tablas.

La base de datos almacena toda la información hidrometeorológica que recibe de las diferentes fuentes (MeteoSwiss, Oficina Federal del Medio Ambiente, etc.). Posteriormente, los datos meteorológicos (observaciones y previsiones) e hidrológicos (medidas de caudales) son enviados al servidor que se encarga de los cálculos hidrológicos. Estas simulaciones hidrológicas se ejecutan varias veces al día, actualizando sus condiciones iniciales con la nueva información recogida.

Los resultados de las simulaciones (principalmente caudales previstos en los principales puntos de control) se envían a la base de datos para su almacenamiento y se publican a continuación en la plataforma web de visualización de resultados. El objetivo es mostrar toda la información útil en la gestión de crecidas, como son los niveles de alerta, las predicciones hidrológicas en los principales puntos de control del río Ródano y sus afluentes, los pronósticos de precipitación en toda la cuenca, el estado de la cobertura de nieve o los niveles de agua en los embalses. Con esta información, el sistema genera un informe de advertencia de crecidas basado en la evolución de la situación hidrológica y en los umbrales definidos en los principales puntos de control.

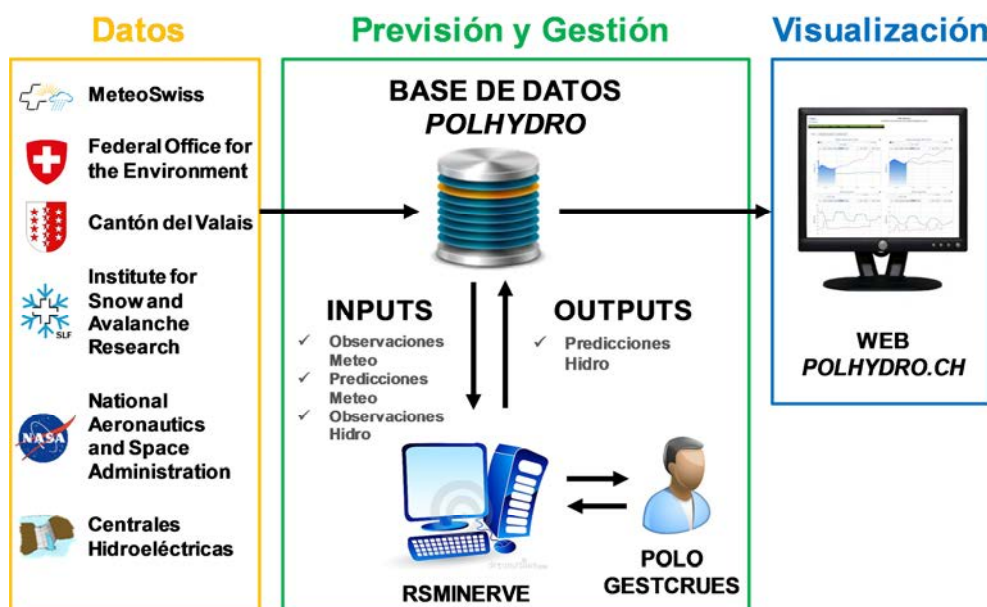


Figura 4.- Esquema del sistema operacional implementado en el río Ródano, Suiza.

Centro de operaciones para el monitoreo hidrometeorológico

El CREALP funciona como centro de información hidrometeorológica para apoyar a la célula de crisis del Cantón del Valais durante los eventos hidrológicos críticos. Para ello se ha creado un grupo de operadores entrenados en el uso de diferentes herramientas meteorológicas e hidrológicas para garantizar el apoyo científico-técnico necesario.

La supervisión se basa en el análisis de datos de precipitación (actual y pasada), temperatura, cobertura de nieve o caudales. Además, la previsión meteorológica proporcionada por MeteoSwiss se analiza al mismo tiempo que las predicciones hidrológicas en los 23 puntos de control principales. Estos puntos han sido seleccionados por los responsables cantonales y corresponden a estaciones de aforo y a puntos sensibles como confluencias o puentes.

En función de la precipitación, MeteoSwiss propone niveles de peligrosidad de 1 (peligro inexistente o de poca importancia) a 5 (peligro muy alto) en 23 regiones a lo largo de la cuenca del Ródano. Al mismo tiempo, diversos puntos de control situados en el río Ródano se utilizan para indicar los niveles de peligro hidrológico (al igual que para la meteorología, de 1 a 5) en función de los diferentes umbrales de caudal fijados por el Cantón del Valais para cada uno de ellos.

La plataforma web *polhydro.ch* proporciona la información hidrometeorológica más reciente a los operadores, así como a la célula de crisis del Cantón del Valais para tomar posibles medidas (medidas de protección estructural, información a la población, evacuación, etc).

Simulaciones hidrológico-hidráulicas con RS MINERVE

El procedimiento de simulación hidrológico-hidráulica utilizado en el sistema MINERVE se ilustra en la **Figura 5**. En primer lugar se ejecuta una simulación de control que permite actualizar las condiciones iniciales (C.I.), también llamadas variables de estado, del modelo hidrológico en el momento de la previsión en base a los datos meteorológicos registrados las 24 h precedentes. Para ello:

- Se adquieren los datos meteorológicos observados las 24 h previas a la previsión.*
- Se extraen las variables de estado al inicio de la simulación de control, que se toman de la anterior simulación ejecutada. En el ejemplo de la **Figura 5** esto corresponde con la extracción de las variables de estado el 01.01.2015 a las 12:00 (punto rojo).*
- Con dichos datos meteorológicos y C.I., se ejecuta el modelo hidrológico para una duración de 24 h y se obtienen las variables de estado en el momento de la previsión (al final del periodo de control). En el ejemplo de la **Figura 5** esto corresponde con la obtención de las C.I. el 02.01.2015 a las 12:00 (punto azul), donde se enlazarará con la previsión.*

A continuación se ejecuta la previsión hidrológica de 72 h de duración atendiendo a lo siguiente:

- Se toman como C.I. del modelo de previsión hidrológica las condiciones finales de la simulación de control previa (punto azul de la **Figura 5**).*
- Se recogen las previsiones meteorológicas COSMO-7 enviadas por la agencia MeteoSwiss para las siguientes 72 h, que servirán como datos de entrada al modelo hidrológico.*
- Se ejecuta el modelo y se obtiene como resultado la evolución prevista de los caudales en los distintos puntos de control de la cuenca para las siguientes 72 h (desde el 02.01.2015 a las 12:00 hasta el 05.01.2015 a las 12:00).*

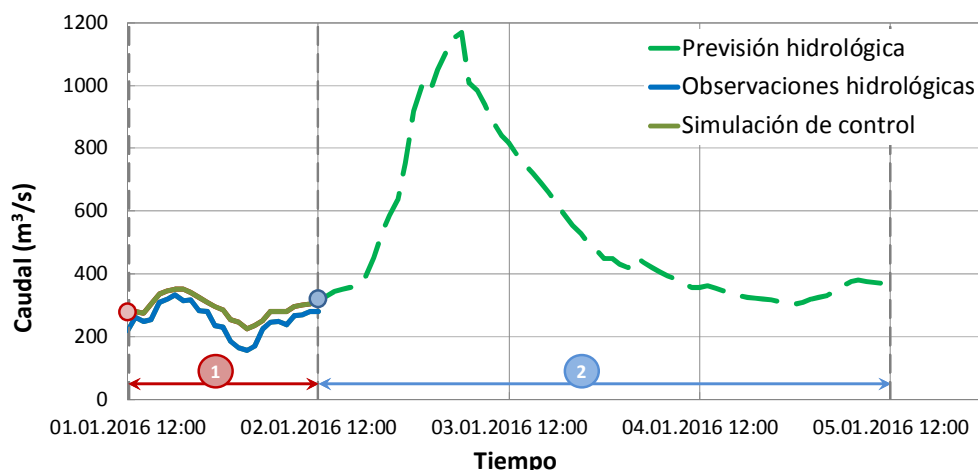


Figura 5.- Ejemplo de distinción entre las fases de simulación de control (1) y previsión (2) en el sistema.

Resultados en tiempo real

Las previsiones hidrológicas se realizan 12 veces al día de manera automática, basándose en las previsiones meteorológicas de las 00:00, 06:00 y 12:00 UTC, y todos los datos de entrada así como los calculados son almacenados en la base de datos. Al mismo tiempo, la plataforma web se actualiza con las nuevas previsiones hidrológicas presentando, para cada punto de control, tanto las observaciones como la previsión de caudal y sus umbrales de advertencia (**Figura 6**)

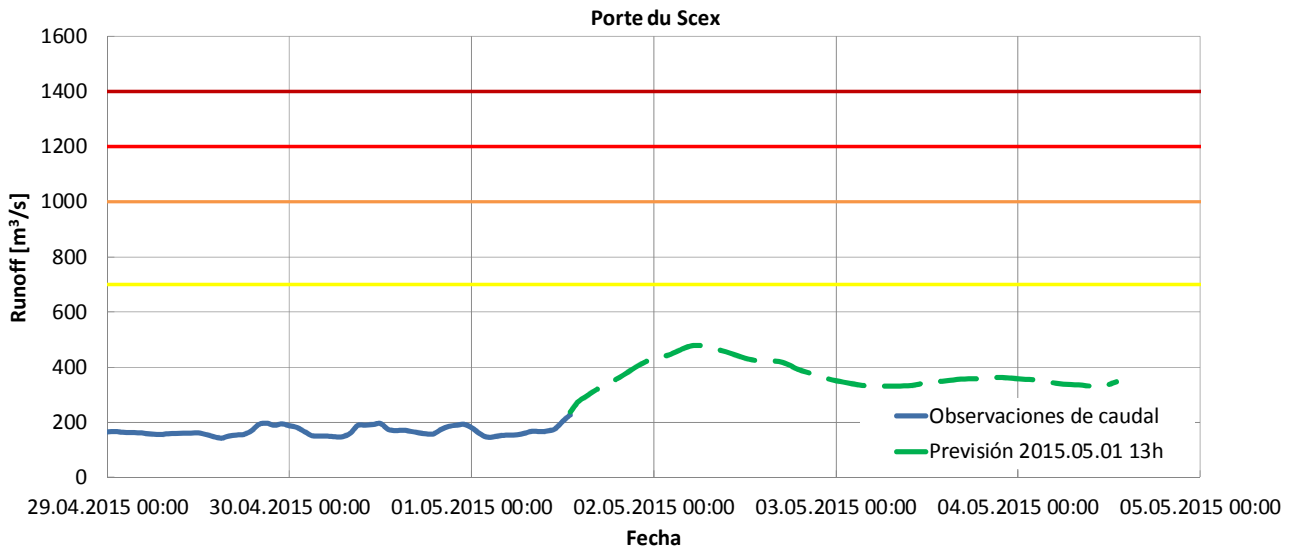


Figura 6.- Ejemplo de la previsión del 1 de mayo del 2015 a las 13:00 en la Porte du Scex.

FUTURAS LÍNEAS DE DESARROLLO

Tras más de 10 años de investigación y 4 años de implementación del sistema de previsiones hidrológicas MINERVE, todavía existen diversas líneas de investigación en curso.

En primer lugar, el sistema ejecuta actualmente la simulación de control con datos meteorológicos basados únicamente en la red de estaciones terrestres de MeteoSwiss, interpolados en el programa RS MINERVE mediante una ponderación de la distancia inversa. Sin embargo, existen otras redes de estaciones de datos que podrían mejorar la calidad de las entradas. Además, se está realizando una mejora en la espacialización de las precipitaciones según técnicas avanzadas como el *kriging* y combinando las diferentes fuentes de datos (Tobin et al., 2011). Esto representará una de las principales mejoras del sistema.

En segundo lugar, el modelo de fusión de nieve actual utiliza un enfoque basado únicamente en la temperatura del aire y calibrado de forma global con los datos de caudal. Teniendo en cuenta la importancia de la contribución de la fusión de nieve en los caudales durante la primavera, especialmente cuando llueve sobre la nieve (Rössler et al., 2014), la modelización de la nieve debe mejorarse con una calibración específica según los datos disponibles (p. ej. MODIS).

En tercer lugar, la parametrización del modelo hidrológico puede actualizarse de forma periódica en base a los nuevos datos meteorológicos y de caudales registrados y disponibles en la base de datos. Además se pueden utilizar los nuevos algoritmos de optimización disponibles para mejorar los resultados y ofrecer mayor robustez al sistema.

Finalmente, una cuestión importante en cualquier sistema operativo es cómo utilizar las observaciones disponibles en tiempo real, tales como las de caudal o de alturas de nieve, para corregir las variables de estado del modelo hidrológico simulado y para aumentar la calidad de las previsiones. Dicho procedimiento se conoce como asimilación de datos y para ello también se está desarrollando una metodología específica.

CONCLUSIONES

El sistema de previsión y gestión de crecidas MINERVE forma parte del procedimiento del Cantón de Valais para la gestión del riesgo hidrológico y de las crecidas. El sistema permite la simulación de caudales en tiempo real en cualquier punto del río Ródano y de sus afluentes con un horizonte de 3 días e integra tanto la previsión hidrometeorológica como los escenarios de gestión de las centrales hidroeléctricas durante eventuales crecidas.

El objetivo del sistema, operacional desde el año 2012, es reducir el riesgo producido por el desbordamiento del río teniendo en cuenta los datos hidrometeorológicos disponibles. Para ello se basa en la explotación y monitoreo de las estaciones meteorológicas y de aforo existentes y en las previsiones meteorológicas. Las previsiones hidrológicas calculadas se envían al órgano cantonal de gestión de crisis que determina el nivel de peligro y toma medidas de protección o intervención adaptadas a cada situación.

Gracias a las mejoras continuas realizadas durante los últimos 4 años, el sistema MINERVE es una referencia en sistemas operacionales de previsión y gestión de crecidas. Basado en una tecnología accesible y un programa de simulación hidrológica gratuito (RS MINERVE), su utilización es posible para cualquier ingeniero o hidrólogo, permitiendo la implementación de sistemas de previsiones operacionales de una forma sencilla.

REFERENCIAS

- Bergström, S.** (1976). *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*. Ph.D. Thesis. SMHI Reports RHO No. 7, Norrköping.
- Bergström, S.** (1992). *The HBV model - its structure and applications*. SMHI Reports RH, No. 4, Norrköping.
- Bérod, D.** (2013). *Estimation et prévision des crues en Valais*, in: Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 40, Swiss Hydrological Commission (CHy), Bern.
- Burnash, R.J.C.; Ferral, R.L., and McGuire, R.A.** (1973). "A generalized streamflow simulation system – Conceptual modelling for digital computers". US Department of Commerce, National Weather Service and State of California, Department of Water Resources, p 204.
- Burnash, R. J. C.** (1995). "The NWS River Forecast System - catchment modeling". In: Singh, V. P. (Ed.). *Computer Models of Watershed Hydrology*, 311-366.
- Consuegra, D.; Niggli, M. and Musy, A.** (1998). "Concepts méthodologiques pour le calcul des crues. Application au bassin versant supérieur du Rhône". *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, Heft 9/10, 223-231.
- Dionisio Calado, A.; Micheloud, S.; García Hernández, J.; Foehn, A.; Ornstein, P. and Claude, A.** (2014). *Operational Snow Cover Mapping and Analysis in the Canton of Valais Based on MODIS Data*. Abstract Volume 12th Swiss Geoscience Meeting, Swiss Academy of Science (SCNAT), Fribourg, Switzerland, 366-367.
- Foehn, A.; García Hernández, J.; Roquier, B. and Paredes Arquiola, J.** (2016). RS MINERVE – User's manual v2.01. *RS MINERVE Group*, Sion, Switzerland.
- García Hernández, J.** (2011a). *Flood management in a complex river basin with a real-time decision support system based on hydrological forecasts*, PhD Thesis N° 5093, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.
- García Hernández, J.** (2011b). *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.; Paredes Arquiola, J.; Foehn, A. and Roquier, B.** (2016). RS MINERVE – Technical manual v2.01. *RS MINERVE Group*, Sion, Switzerland.
- García Hernández, J.; Claude, A.; Paredes Arquiola, J.; Roquier, B. and Boillat, J.-L.** (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". *Swiss Competences in River*

Engineering and Restoration, Schleiss, Speerli & Pfammatter Eds, 87-97. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02676-6.

García Hernández, J. ; Boillat, J.-L. ; Jordan, F. and Hingray, B. (2009). *La prévision hydrométéorologique sur le bassin versant du Rhône en amont du Léman*. Houille Blanche, (5). 61–70. ISSN 0018-6368. doi: 10.1051/lhb/2009057.

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*. Thesis Report N°3711, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL, Lausanne, Switzerland.

Jordan, F. ; García Hernández, J. ; Dubois, J. ; Boillat, J.-L. and Schleiss, A. (2008). *Minerve - Modélisation des intempéries de nature extrême du Rhône valaisan et de leurs effets*, Communication 38 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ed. A. Schleiss, EPFL, Lausanne.

Jordan, F. ; Boillat, J.-L. and Schleiss, A. (2010). *Prévision et gestion des crues du Rhône supérieur par l'exploitation optimale des retenues alpines*. Houille Blanche, (5). 91–102. ISSN 0018-6368. doi: 10.1051/lhb/2010060.

McGuinness, J.L. and Bordne, E.F. (1972). "A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values". Technical Bulletin 1452, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., 71 pp.

Metcalf and Eddy (1971). University of Florida, and Water Resources Engineers. Storm Water Management Model, Vol. I. Final Report, 11024DOC07/71 (NTIS PB-203289), U.S. EPA, Washington, DC, 20460.

Michel, C. and Edijatno (1988). *Réflexion sur la mise au point d'un modèle pluie-débit simplifié sur plu-sieurs bassins versants représentatifs et expérimentaux*. CEMAGREF Antony.

Oudin, L. (2004). *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinente comme entrée d'un modèle pluie-débit global*. Thèse, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Paris.

Peña, J. C.; Schulte, L.; Badoux, A.; Barriendos, M. and Barrera-Escoda, A. (2015). *Influence of solar forcing, climate variability and modes of low-frequency atmospheric variability on summer floods in Switzerland*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 19(9). 3807–3827. ISSN 1607-7938. doi: 10.5194/hess-19-3807-2015.

Perrin, C., Michel, C. and Andréassian, V. (2003). "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation". Journal of Hydrology 279, 275-289.

Rössler, O.; Froidevaux, P.; Börst, U.; Rickli, R.; Martius, O. and Weingartner, R. (2014). "Retrospective analysis of a nonforecasted rain-on-snow flood in the Alps – a matter of model limitations or unpredictable nature?" Hydrol. Earth Syst. Sci., 18(6). 2265–2285. ISSN 1607-7938. doi: 10.5194/hess-18-2265-2014.

Schäfli, B.; Hingray, B.; Niggli, M. and Musy, A. (2005). "A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments". Hydrology and Earth System Sciences Discussions 2, 73-117.

Tobin, C.; Nicotina, L.; Parlange, M. B.; Berne, A. and Rinaldo, A. (2011). "Improved interpolation of meteorological forcings for hydrologic applications in a Swiss Alpine region". J. Hydrol., 401(1-2). 77–89. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.02.010.

Turc, L. (1955). « Le bilan de l'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement ». Ann. Agro. 6, 5-152, INRA.

Turc, L. (1961). « Évaluation des besoins en eau d'irrigation, formule climatique simplifiée et mise à jour ». Ann. Agro. 12: 13-49, INRA.

Verbunt, M.; Zappa, M.; Gurtz, J. and Kaufmann, P. (2006). *Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin*. J. Hydrol., 324(1-4). 224–238. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.09.036.