

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

DESARROLLO DE UN SISTEMA INTEGRADO PARA EL PRONÓSTICO DE CAUDALES EN CUENCAS DE MONTAÑA PARA LA OPERACIÓN DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

LINA CASTRO

FRANCISCO SUÁREZ

TAMARA MAASS

BONIFACIO FERNÁNDEZ

RESUMEN

La operación eficiente de los sistemas de aprovechamiento de los recursos hídricos está fuertemente influenciada por la predicción de caudales disponibles en sus cuencas aportantes. Este trabajo presenta un sistema integrado para el pronóstico de caudales en cuencas de montaña que permita optimizar la operación de centrales hidroeléctricas. Este sistema integrado sería un cambio radical en la forma de realizar el pronóstico de caudales. Este proyecto investiga una metodología integrada donde, en vez de privilegiar la información histórica, se privilegie la información actual del estado de la cuenca y su distribución espacial. El sistema integrado está compuesto por un modelo hidrológico de base física, que es la herramienta de predicción propiamente tal, en conjunto con una metodología de recolección remota y distribuida de datos que permite alimentar al modelo hidrológico en tiempo real, el uso de pronósticos meteorológicos y el funcionamiento integrado de la unión de todos los componentes del sistema.

¹ Ingeniera de Proyecto, Depto. de Ingeniería Hidráulica, Pontificia Universidad Católica – lecastro@uc.cl

² Profesor Asistente, Depto. de Ingeniería Hidráulica, Pontificia Universidad Católica – fsuarez@ing.puc.cl

³ Ingeniera de Proyecto, Depto. de Ingeniería Hidráulica, Pontificia Universidad Católica – tmaass@uc.cl

⁴ Profesor Titular, Depto. de Ingeniería Hidráulica, Pontificia Universidad Católica – bfernand@ing.puc.cl

1. Introducción

La operación eficiente de los sistemas de aprovechamiento de los recursos hídricos está fuertemente influenciada por la predicción de caudales disponibles en sus cuencas aportantes. En el caso de Chile, estas cuencas están localizadas en la Cordillera de Los Andes y son de tamaño relativamente pequeño. En estas cuencas, los pronósticos se han llevado a cabo por medio de modelos estadísticos (regresiones) y estocásticos, altamente dependientes de un sistema de registro meteorológico que a menudo es limitado o no se encuentra disponible (CDEC-SIC, 2000). Bajo condiciones normales, el pronóstico de caudales con modelos estocásticos es razonablemente bueno. Sin embargo, en situaciones de tormentas y crecidas o en época de sequías, las estimaciones de caudales generalmente son deficientes. El pronóstico a mediano plazo, semanas a meses, depende de las condiciones de la cuenca y de la posibilidad de disponer de un buen pronóstico meteorológico para el plazo de previsión. Para la operación de sistemas con embalse, el pronóstico a mediano plazo es fundamental para la operación y optimización del sistema. Por ejemplo, un buen pronóstico permitiría optimizar la cantidad de agua utilizada en períodos de alta demanda durante el verano, ya sea para generación eléctrica, riego o usos consuntivos, además de permitir evaluar las condiciones futuras del otoño siguiente en el sistema eléctrico.

En Chile, el Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC - SIC) realiza pronósticos de caudales de deshielo para la operación del sistema interconectado central. Para ello, el procedimiento tradicional se ha basado en una modelación estadística donde el volumen de deshielo se relaciona con variables como la precipitación, nieve observada en la cuenca a fines del invierno, temperaturas, y otras variables meteorológicas (CDEC-SIC, 2000). Las relaciones estadísticas se basan en observaciones realizadas durante más de 30 años en todas las cuencas donde el CDEC realiza un pronóstico con interés hidroeléctrico. Sin embargo, este método que se ocupa hace más de 30 años, ha alcanzado el límite de calidad y confiabilidad al dar pobres resultados en situaciones fuera del rango medio, siendo actualmente difícil de adaptar a condiciones meteorológicas extremas, de años muy húmedos o muy secos, o a los efectos del cambio climático.

El objetivo de este artículo es describir los avances realizados en el desarrollo de un sistema integrado, que permita mejorar el pronóstico de caudales en cuencas de montaña, con el propósito de optimizar la operación del sistema eléctrico total. Este sistema se basa en una metodología integrada que privilegiará la información actual del estado de la cuenca y su distribución espacial, a diferencia de metodologías basadas en relaciones estadísticas de largo plazo. El sistema integrado está compuesto por un modelo hidrológico de base física, que es la herramienta de predicción propiamente tal, en conjunto con una metodología de recolección remota y distribuida de datos que permite alimentar al modelo hidrológico en tiempo real. Además, consta de una red de monitoreo meteorológico en tiempo real, pronósticos meteorológicos de modelos climáticos de gran escala y el

funcionamiento integrado de la unión de todos los componentes del sistema a través de una plataforma web. El desarrollo de esta nueva metodología pretende reducir la incertidumbre en la predicción de caudales y por lo tanto permitirá un mejor manejo de los recursos hídricos para la generación hidroeléctrica. Adicionalmente, se espera que sea una herramienta muy importante para la operación de los nuevos proyectos que se desarrollen en cuencas donde no exista información histórica o sean cuencas de régimen pluvial.

En las siguientes secciones se describe el sistema de pronóstico propuesto, los puntos de pronósticos escogidos como sistemas piloto de evaluación, la información disponible y requerida para la modelación hidrológica, el esquema de pronóstico meteorológico, el despliegue actual de la red de monitoreo meteorológico en tiempo real y la propuesta de plataforma web para la operación en tiempo real del sistema de pronóstico hidrológico.

2. Sistema de pronóstico hidrológico para la generación hidroeléctrica

El sistema de pronóstico propuesto busca optimizar el uso de los recursos hídricos al integrar un conjunto de procedimientos y metodologías que sirvan para pronosticar en tiempo real los caudales a corto y mediano plazo en cuencas de montaña. Para ello, se están implementando herramientas actuales para la evaluación de los recursos hídricos, incorporando información hidrometeorológica disponible con sensores remotos y pronósticos meteorológicos de gran escala. El sistema de pronóstico propuesto contiene cuatro componentes: i) un modelo hidrológico distribuido de base física; ii) datos meteorológicos adquiridos en forma remota y en tiempo real; iii) información satelital para la simulación, calibración y asimilación de datos en la modelación hidrológica; y iv) pronósticos meteorológicos de modelos climáticos a corto y mediano plazo. A continuación se describen estos componentes y los desafíos del desarrollo de este sistema.

2.1 Modelo hidrológico

La modelación hidrológica del sistema de pronóstico propuesto se hace con el modelo SWF-PUC (Simulation and Forecasting Model – Pontificia Universidad Católica de Chile) (Castro, 2013). Este es un modelo hidrológico distribuido de base física que permite la estimación diaria del caudal a la salida de una cuenca, y la incorporación de fuentes no convencionales de información (sensores remotos y plataformas en tiempo real). El modelo utiliza las ecuaciones de conservación de masa y de energía para representar el movimiento del agua a través del espacio (dominio superficial y sub-superficial). El modelo hidrológico trabaja sobre un modelo de elevación digital de terreno (DEM – Digital Elevation Model) con el cual se divide horizontalmente la cuenca de estudio en celdas de igual tamaño. Cada celda dentro de la grilla de simulación se trata independientemente como un sistema donde se aplica el balance hidrológico. En cada una de ella se estiman los principales procesos hidrológicos: intercepción, evapotranspiración, infiltración, acumulación y derretimiento de nieve, recarga subterránea, flujo superficial y subterráneo.

La Figura 1 muestra el esquema de modelación hidrológica del sistema de pronóstico hidrológico. Los componentes principales de la modelación hidrológica son la simulación y calibración del modelo para la cuenca de estudio, y la operación del modelo con fines de pronóstico hidrológico. Para el desarrollo, calibración y puesta en funcionamiento del modelo hidrológico y del sistema operacional de pronóstico, es necesario disponer de información hidrometeorológica de terreno, especialmente de datos diarios de precipitación y temperatura, y la incorporación de información satelital. El modelo incorpora métodos para la estimación espacial y para la desagregación temporal de la precipitación diaria y la temperatura máxima y mínima diaria.

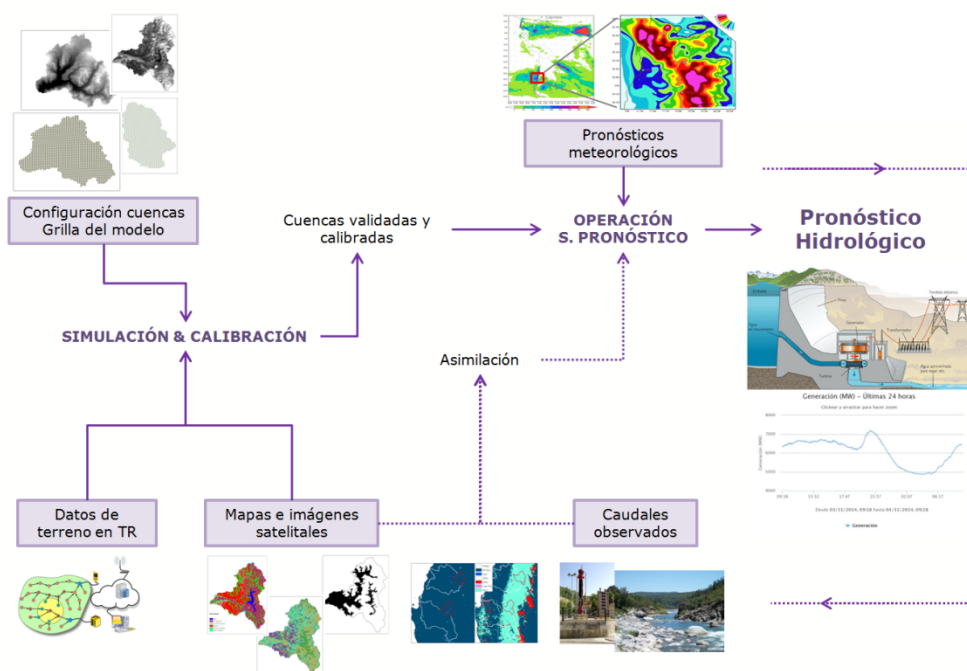


Figura 1. Esquema de modelación hidrológica en el sistema de pronóstico hidrológico.

El sistema integrado de pronóstico de caudales que se está desarrollando, además de utilizar la información hidrometeorológica disponible en cada cuenca y la operada por la Dirección General de Aguas, considera la instalación de una red de sensores meteorológicos operados de forma remota, y con disponibilidad de datos en tiempo real. Adicionalmente, utiliza la siguiente información satelital: modelo DEM, cobertura de suelo, textura del suelo, índice de área foliar (LAI – leaf area index), albedo y superficie cubierta de nieve. El Modelo DEM se obtiene de la SRTM (<http://srtm.csi.cgiar.org/>) y se usa para definir la configuración de la cuenca por medio de grillas de simulación.

Una vez validada y calibrada la cuenca de análisis, se procede a operar el sistema usando los pronósticos meteorológicos. Según el procedimiento de estimación de caudales que se utiliza en Chile (CDEC-SIC, 2000), el pronóstico se hace de manera semanal desde el inicio hasta el final de la temporada de deshielo (Septiembre-Marzo). Consecuentemente,

los parámetros del modelo hidrológico se actualizarán para cada semana de pronóstico a partir de un proceso de asimilación de datos. En la asimilación, se emplean los registros de caudal y las imágenes satelitales de área cubierta de nieve de la primera semana pronosticada. Este procedimiento consiste en una actualización de los parámetros que están involucrados en la distribución espacial y temporal de las variables meteorológicas, así como de otros parámetros que estén involucrados en la acumulación y derretimiento de nieve. Una vez asimilados los datos, se procede nuevamente a realizar el pronóstico con los pronósticos actualizados y los parámetros restablecidos.

2.2 Red de monitoreo meteorológico

Este componente del sistema de pronóstico consiste en la instalación de estaciones meteorológicas estándar OMM (Organización meteorológica mundial) y microestaciones que permiten monitorear en tiempo real y de manera remota las siguientes variables meteorológicas: temperatura y humedad relativa del aire, velocidad y dirección del viento, humedad del suelo, y precipitación (como agua o en forma de nieve). El sistema integrado considera más relevante contar con mayor cantidad de información actual al momento de realizar los pronósticos, en vez de contar con largas series históricas de estaciones que no necesariamente representan la condición actual de la cuenca, y que podrían ser poco representativas en eventos extremos. Por lo tanto, en cada aplicación del sistema integrado se busca instalar las estaciones en los lugares más representativos de la cuenca de estudio. Un componente importante del sistema integrado es el sistema de comunicación y transmisión de datos de terreno. El sistema de comunicación almacenará los datos localmente y los transmitirá de manera remota de modo que el modelo hidrológico pueda ser operado en tiempo real.

2.3 Esquema de pronóstico meteorológico

El sistema integrado considera usar pronósticos meteorológicos con el fin de incorporarlos en el sistema de pronóstico hidrológico. La Figura 2 presenta el esquema metodológico que se está utilizando para realizar el pronóstico meteorológico. En la actualidad, existen varios modelos climáticos disponibles gratuitamente que pueden ser implementados en este tipo de estudios (ej: The Weather Research and Forecasting - WRF, The Global Ensemble Forecast System - GEFS, European Center for Medium Range Weather Forecasting - ECMWF, Weather Forecasting System - CFS). El sistema integrado que se está desarrollando necesita un modelo de pronóstico meteorológico que sea capaz de entregar las principales variables de entrada del modelo hidrológico: precipitación, y temperaturas máximas y mínimas. Estas variables se requieren a una escala temporal diaria y para toda la temporada de deshielo. Sin embargo, los resultados de un modelo climático generalmente no coinciden con los datos registrados en terreno ya que estos modelos son sistemas de ecuaciones basados en leyes físicas (Maraun, 2013). Si bien estos modelos entregan valores bastante buenos de las variables meteorológicas de interés, es necesario saber qué tan bien representan los datos observados, y hacer correcciones en caso de ser

necesario. El sistema integrado propone utilizar el modelo CFSv2 (Climate Forecast System version 2) (Saha et al., 2014), corregir el sesgo del pronóstico meteorológico usando el método Quantile Mapping (Panofsky and Brier, 1968; Wood et al., 2002), y aplicar un método de desagregación espacial con el fin de incorporar los pronósticos al modelo hidrológico.

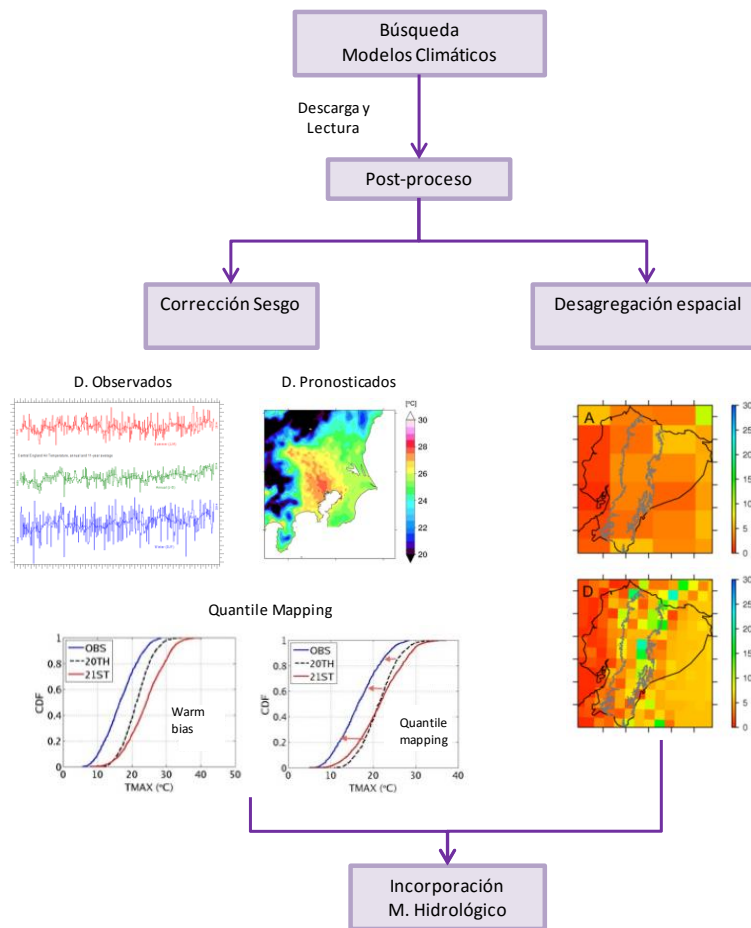


Figura 2. Esquema de pronóstico meteorológico a implementar en el sistema de pronóstico hidrológico.

3. Aplicación de sistema de pronóstico

Las regiones del Maule y del Bío-Bío (Figura 3) concentran aproximadamente el 74% de la potencia hidroeléctrica instalada en Chile (CDEC, 2012). Para la planificación de la operación de las unidades generadoras del Sistema Interconectado Central (SIC), el CDEC-SIC tiene establecidos seis puntos de pronóstico sobre la cuenca del río Laja en la región del Bío-Bío, y 12 puntos de pronóstico sobre la cuenca del río Maule. Dada la importancia que tienen ambas cuencas en la generación hidroeléctrica del país, se seleccionaron dos puntos de pronóstico: (1) Afluente Laguna Invernada (ALI) en la cuenca del río Maule; y (2) Captación Alto Polcura (CAP) en la cuenca del río Bío-Bío (Figura 3). La cuenca

aportante al punto ALI tiene un área de 807 km² y una elevación que va desde los 1294 hasta los 3937 msnm, mientras que la cuenca aportante al punto CAP tiene 236 km² y una elevación que va desde los 1340 hasta los 3023 msnm. El clima predominante en la región del Maule y Bío-Bío es templado-cálido, con precipitaciones que superan los 1000 mm de promedio anual y una temperatura promedio de 10°C. El régimen hidrológico de la ALI es nival y de CAP nivo-pluvial, donde el aporte por derretimiento (primavera - verano) equivale a un 50 – 90% del volumen anual generado. El caudal medio anual en ALI es de 27 m³ s⁻¹ con un promedio mensual mínimo al final del invierno y un promedio mensual máximo a comienzos del verano. En CAP caudal medio anual es del orden de los 7 m³ s⁻¹, con un promedio mensual mínimo casi siempre al final del otoño y un promedio mensual máximo al final de la primavera, casi siempre en el mes de noviembre.

Actualmente, las estaciones meteorológicas disponibles en las cuencas del Maule Alto y Laja son pocas para hacer algún tipo de inferencia de la distribución espacial de la temperatura y precipitación en las cuencas de análisis (ALI y CAP). Para la cuenca ALI el único registro meteorológico se encuentra en la Central Cipreses. En el caso de la cuenca CAP, no existe ninguna estación meteorológica cerca de la cuenca. La única estación es la que se encuentra en la Central Abanico a 40 km al sur de la cuenca. Las dos estaciones son propiedad de Endesa, tienen más de 40 años de uso y sus registros no se encuentran disponibles en tiempo real.

La primera etapa del desarrollo del sistema integrado consistió en la instalación de 5 estaciones meteorológicas: 2 en el Maule (sub-cuenca Invernada) y 3 en el Laja (sub-cuenca Alto Polcura). Dos de esas estaciones mejoran la información meteorológica que actualmente recolectan las estaciones de las centrales Cipreses y Abanico. En la Tabla 1 se describe el emplazamiento de las estaciones, las variables que miden cada una de ellas y el medio de transmisión de datos. La Figura 4 muestra la ubicación de las estaciones en las cuencas de estudio y la Figura 5 muestra el registro de algunas de las variables que se están monitoreando en tiempo real.

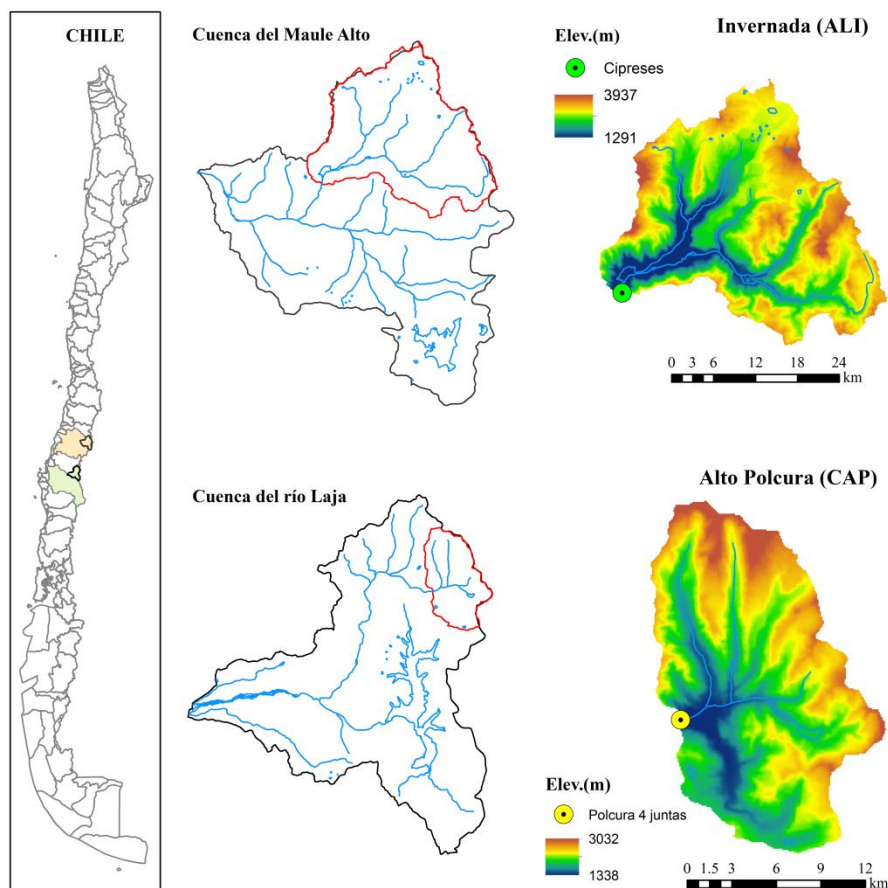


Figura 3. Mapa de la zona de estudio. Localización de las subcuencas de estudio. Mapa de elevaciones de la subcuenca Afluente Laguna Invernada y Alto Polcura.

Tabla 1. Descripción estaciones estándar OMM y las microestaciones.

Nombre Estación	Tipo	Ubicación	Variabes	Transmisión datos
Btma. Invernada	Estándar OMM Pararrayos	Lag. Invernada- Maule	Prec., SWE, Temp. y HR, Rad, Vel. y Dir. Viento, altura de nieve.	Satelital
Alto Polcura	Estándar OMM Pararrayos	Alto Polcura-Laja	Idem.	Satelital
Quemazones	LATINA	Quemazones-Laja	Prec., Temp. y HR, altura de nieve.	Satelital
Abanico	LATINA	Laja	Prec. (Líquida y sólida), Temp. y HR, altura de nieve.	WIFI
Cipreses	LATINA	Maule	Prec. (Líquida y sólida), Temp. y HR, altura de nieve.	Celular

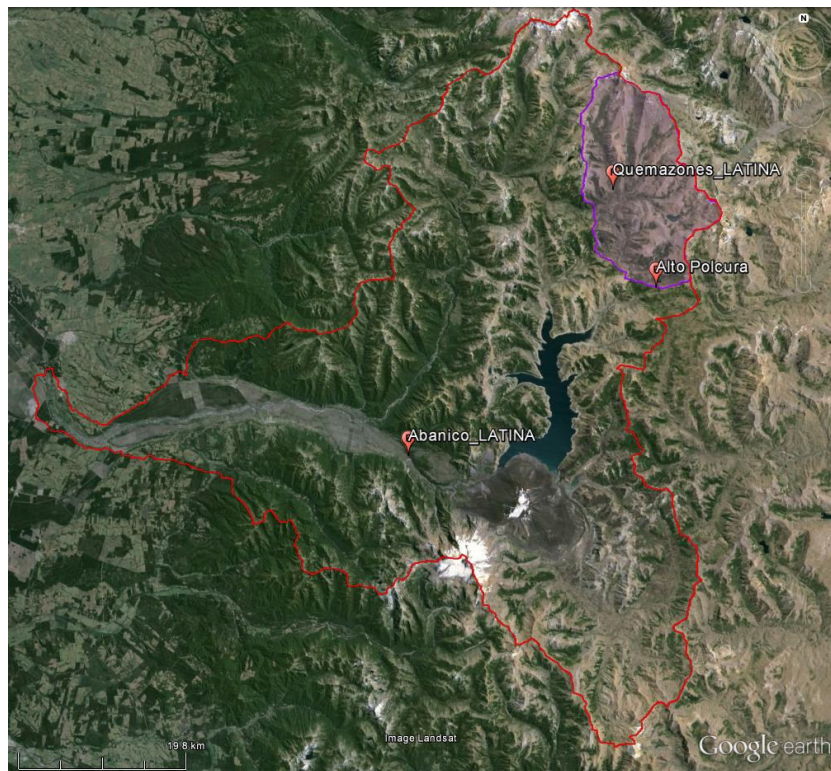
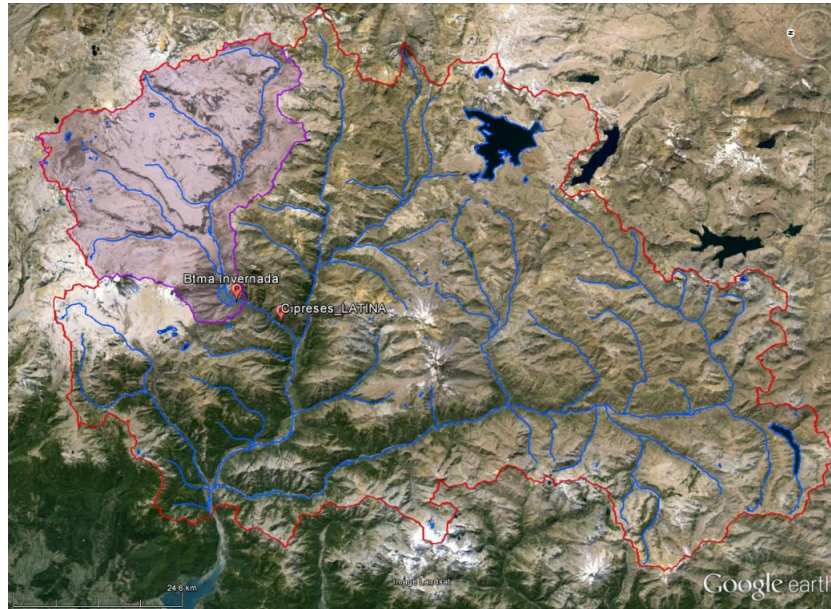


Figura 4. Emplazamiento de estaciones meteorológicas en Maule (arriba) y Laja (abajo).

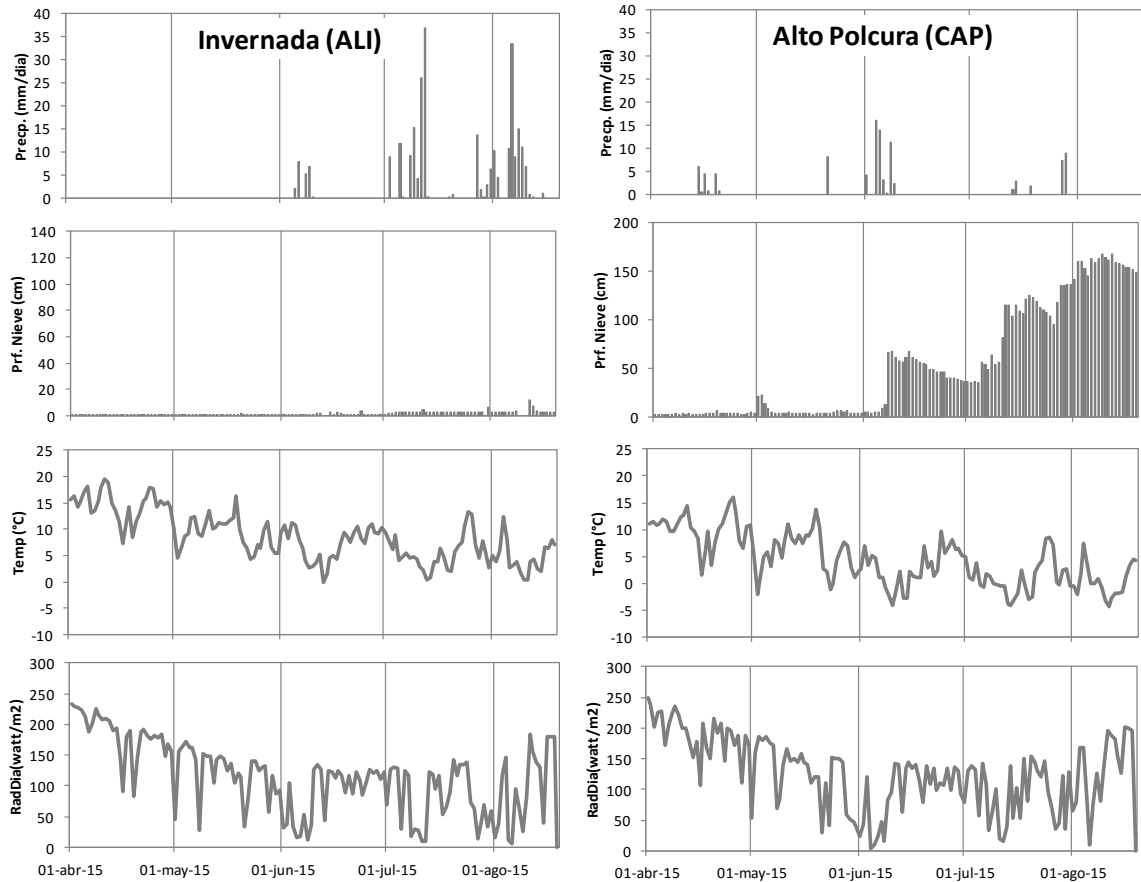


Figura 5. Datos registrados hasta la fecha en las estaciones Btma. Invernada y Alto Polcura.

Simulación y Calibración cuencas ALI y CAP

Para la simulación y calibración del modelo hidrológico es necesario disponer de información hidrometeorológica de terreno de la cuenca del Maule y Laja, la que será complementada con información satelital. La información satelital incorporada al modelo hidrológico se lista en la Tabla 2. La delimitación de las cuencas ALI y CAP, y su caracterización fisiográfica se hizo en base al Modelo DEM obtenido de la SRTM con 90 m de resolución espacial (<http://srtm.csi.cgiar.org/>). La delimitación de las cuencas se realizó tomando como punto de cierre la estación fluviométrica Cipreses en ALI y Polcura 4 Juntas en CAP. La grilla de simulación para ALI comprende 2300 celdas con un tamaño de pixel de 615 m, mientras que la grilla de simulación para CAP comprende 1933 celdas de 360 m cada una. Una vez definidas las celdas de simulación por cuenca, se obtuvieron los siguientes valores requeridos por el modelo para cada una de las celdas: coordenadas, elevación, pendiente, orientación, latitud y longitud. Para la calibración del modelo, se decidió emplear 5 años hidrológicos empezando en abril de 2009 y terminando en Marzo de 2015. El esquema de calibración, se realizará por cada año hidrológico, por periodo estacional (acumulación y derretimiento) y por el total de los años evaluados. Los

resultados preliminares de las calibraciones por año hidrológico en la cuenca CAP se muestran en la Figura 6.

Tabla 2. Información utilizada para la simulación de las cuencas.

Dato	Periodo descarga	Fuente
DEM	NA	DEM SRTM (90m) http://srtm.csi.cgiar.org/
Suelos	Marzo 2003	LandSat (30m) http://glovis.usgs.gov/
LAI	01/Abril/2012 hasta 31/Marzo/2013	MOD15A2 y MYD15A2 (1km) http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/
Textura Suelos	NA	Mapa 1:5.000.000 http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home
SCA	01/Abril/2009 hasta 31/Marzo/2015	MOD10A2 y MYD10A2 (500m) http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/

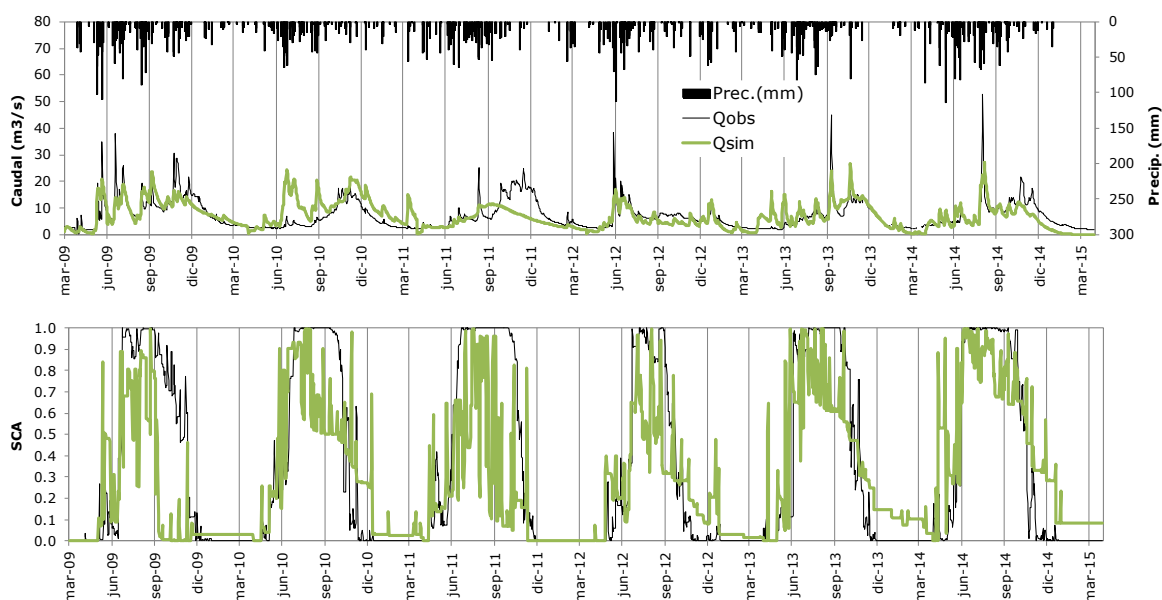


Figura 6. Calibración de caudales diarios en CAP en los años hidrológicos entre 2009 - 2015.

4. Conclusión y trabajo futuro

Para finalizar el sistema de pronóstico hidrológico propuesto es necesario incorporar al modelo hidrológico distribuido, una vez corregidos y escalados, los pronósticos meteorológicos del modelo CFSv2. Una vez se inicie el pronóstico de caudales de deshielo, será necesario aplicar la asimilación de datos usando los registros de caudal observados y el SCA observado con imágenes satelitales de manera semanal. El sistema de pronóstico se implementará bajo una plataforma web que espera estar lista para Septiembre de 2016, con el objetivo que sea una herramienta para la operación de los sistemas hidroeléctricos

actuales o de los nuevos proyectos que se desarrollen en cuencas donde no exista información histórica o sean de régimen pluvial.

5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a ENDESA como socio del proyecto Fondef bajo el cual se está desarrollando la I+D, así como a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) y al Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF), por financiar el proyecto FONDEF IT13120037.

6. Referencias

Castro, 2013. Modelación hidrológica distribuida en cuencas de montaña poco instrumentadas. Tesis Doctoral. Pontificia Universidad Católica de Chile. Noviembre 2013.

CDEC-SIC. 2000. Manual de procedimientos del reglamento interno. Punto IV: Definición de los caudales a utilizar para planificar la operación.

CDEC-SIC, 2012. Licitación Pronóstico de deshielo cuencas ríos Aconcagua, Colorado, Rapel, Maule, Laja y Biobío. Periodo 2012-2013. Términos de referencia.

Maraun, D. 2013. Bias correction, quantile mapping, and downscaling: Revisiting the inflation issue. *Journal of Climate* 26(6), 2137-2143.

Saha, S., S. Moorthi., X. Wu., J. Wang., S. Nadiga., P. Tripp., D. Behringer., Y. Hou., H. Chuang., M. Iredell., M. Ek., J. Meng., R. Yang., M. Peña., H. Dool., Q. Zhang., W. Wang., M. Chen, y E. Becker. 2014. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 27(6), 2185-2208.

Panofsky, H. A. and Brier, G. W.: Some Applications of Statistics to Meteorology, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA, 224 pp., 1968.

Wood, A. W., Maurer, E. P., Kumar, A., and Lettenmaier, D. P.: Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States, *J. Geophys Res.*, 107, 4429, doi:10.1029/2001JD000659, 2002.