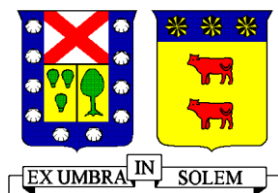


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE



“DESARROLLO DE MODELOS DE SIMULACIÓN DE CAUDALES DE
DESHIELO EN CUENCA DEL RIO MELADO”

CARLOS MAURICIO JORQUERA VARAS

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil

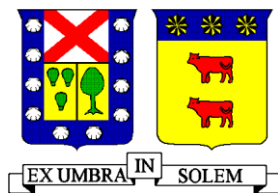
Profesor Guía
Gabriel Antonio Castro Araya

Profesor Co-Referente
Ludwig Stöwhas Borghetti

Junio de 2017

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE



“DESARROLLO DE MODELOS DE SIMULACIÓN DE CAUDALES DE
DESHIELO EN CUENCA DEL RIO MELADO”

Memoria de titulación presentada por
CARLOS MAURICIO JORQUERA VARAS

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Gabriel Antonio Castro Araya

Profesor Co-Referente
Ludwig Stöwhas Borghetti

Junio de 2017

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a mis padres, hermanos e hija, gracias por su apoyo, comprensión y cariño. Gracias a mi madre, Ana Varas, quien nos entrega siempre su amor y comprensión. Una mujer humilde y cariñosa, que siempre nos enseña a ser mejores personas. Gracias a mi padre, Carlos Jorquera, quien siempre se esforzó por entregar la mejor educación a sus hijos, es un ejemplo de esfuerzo y trabajo. Gracias a mis hermanos, Daniela y Cristian, con quienes siempre nos hemos apoyado y acompañado, dos grandes profesionales y esposos. Gracias a mi hija Camila, quien apareció en el último año de la universidad y por quien vivo intentando ser un buen padre, como me enseñaron los míos. También a los nuevos integrantes Violeta, Emiliano, Paulina, Bernardo y la Monse...

También hay que agradecer a mis amigos y compañeros de estudios.... Jimena, Germán, Fernando, Cesar, Diego y muchos otros... gracias por la amistad y apoyo en las largas jornadas de estudio.... A mis amigos de la vida Crespa, Chuncho, Giggio, Puchu, Topo, Negro, Pato, Enzo, Chica, Pili, Iber, Leo, Chespi, Huaso, Vane, Partner, Ariel, Rob, Varas...

Finalmente gracias a la familia CONIC-BF, a Raúl Demangel y Ernesto Menchaca, excelentes personas y profesionales, quienes me permitieron desarrollar el trabajo de título y apoyaron en esta larga camino. También a mis amigos de CONIC-BF... Susana, Maria, Juan, Silvia, David, Daniel, Jaime, Alfred, los Hugos, Javito, Diego, Leo, Mabri, José, Víctor... con quienes he trabajado y compartido buena parte de mi vida.

Al profesor Ludwig Stöwhas por el último empujón para finalizar este trabajo, y por último al profesor guía y ahora colega, Gabriel Castro, perteneciente a la familia CONIC-BF, quien me ayudó a sacar adelante esta memoria y muchos otros trabajos....

GRACIAS TOTALES....

Dedicada a mi hija Camila, por su amor y alegría...

Nunca es tarde para concretar lo que uno quiere...

RESUMEN

Se realizaron modelos de simulación de caudales orientados a estimar la disponibilidad de recursos hídricos durante la temporada de deshielo. Para ello se seleccionó la cuenca Afluente al Embalse Melado, ubicada en la región del Maule, la que presenta un comportamiento nivopluvial.

Los modelos desarrollados corresponden a los siguientes tipos:

- **Modelos estadísticos**, basado en regresiones de tipo multilineal con componentes autoregresivas, los cuales permiten definir el volumen total de escurrimiento de la temporada de deshielo. Mediante la combinación de las variables predictoras (precipitaciones, rutas de nieve, cobertura nival y caudales observados en meses anteriores) se confeccionaron 21 modelos, considerando la información disponible desde el año 2000 a 2015.
- **Modelo del tipo fusión de nieve**, el modelo propuesto corresponde a “Snowmelt Runoff Model” (SRM) el cual corresponde a una herramienta computacional destinada a la modelación y simulación del caudal medio diario en cuencas montañosas. El modelo SRM incluye las variables de precipitación, cobertura nival y temperatura, todos a nivel diario.

Los modelos desarrollados permiten obtener resultados aceptables para el pronóstico de caudales de deshielo. El análisis de calidad de los resultados obtenidos con ambos modelos se realiza a través de la evaluación de los índices de bondad (R^2 , e_y , N.S. y N.S.LN), los cuales son altos y representan un buen ajuste para determinar el caudal de deshielo de la temporada.

Finalmente, para la aplicación del pronóstico de caudales de deshielo, el modelo SRM permite realizar el seguimiento del caudal de deshielo, a nivel mensual, semanal y/o diario, con lo cual es posible planificar diversos usos del agua, especialmente en épocas de escasez hídrica.

Keywords: modelo hidrológico, caudal de deshielo, modelo estadístico, Snowmelt Runoff Model, SRM, cobertura nival.

ABSTRACT

Flow simulation models were used to estimate the availability of water resources during the snowmelt season. For this purpose, the Embalse Melado basin was selected, located in the Maule region, which presents a rain and snow mixed behavior.

The models developed correspond to the following types:

- **Statistical models**, based on multi-linear regressions with autoregressive components, which allow to define the total volume of runoff of the snowmelt season. A total of 21 models were prepared by combining the predictive variables (rainfall, snow routes, snow cover and flow rates observed in previous months), considering the available information from 2000 to 2015.
- **Model of the melting snow type**, The proposed model corresponds to Snowmelt Runoff Model (SRM), which corresponds to a computational tool for the modeling and simulation of average daily flow in mountainous basins. The SRM model includes the precipitation, snow cover and temperature variables, all at a daily level.

The developed models allow to obtain acceptable results for the forecast of melt flow rates. The quality analysis of the results obtained with both models is done through the evaluation of goodness indexes (R^2 , e_y , N.S. y N.S.LN), which are high and represent a good fit to determine the melt flow rate of the season.

Finally, for the application of the melt flow forecast, the SRM model allows monitoring the melt flow at monthly, weekly and / or daily level, which makes it possible to plan different water uses, especially in times of water shortage.

GLOSARIO

DGA	Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas.
$P_{p_{oct-mar}}$	Precipitación acumulada octubre-marzo.
$P_{p_{abr-sept}}$	Precipitación acumulada abril-septiembre.
EA	Equivalente de agua de la temporada.
Q_{n-1} , Q_{n-2} y Q_{n-3}	Caudal mensual observado de 1, 2 o 3 meses anteriores.
Q_{max}	Caudal máximo del periodo octubre-marzo.
ICN	Índice de Cobertura Nival (relación entre la cobertura nival obtenida a fines de invierno con el valor máximo de equivalente de agua de la ruta de nieve controlado en la temporada)
R^2	Coeficiente de determinación.
e_y	Error estándar.
N.S.	Eficiencia de Nash-Sutcliffe.
N.S.LN	Índice de Nash-Sutcliffe asociado al logaritmo de los caudales
$Q_{obs.}$	Caudal observado.
$Q_{sim.}$	Caudal simulado.
SRM	Snowmelt Runoff Model o Modelo de Escorrentía de Nieve Fundida.
a_{mn}	Factor grado día en ($cm \cdot ^\circ C^{-1} \cdot d^{-1}$).
C_{Rmn}	Coeficiente de escorrentía para la lluvia.
C_{Smn}	Coeficiente de escorrentía para la nieve.
S_{mn}	Porcentaje de cobertura nival.
T_n	Número de grado-días [$^\circ C \cdot d$].
ΔT_{mn}	Variación de temperatura desde la estación base a la banda para ajustar T cuando solo se disponen de datos en una estación meteorológica.
A_m	Área de la banda m.
Q_n	Caudal en el tiempo n.
P_{mn}	Precipitación en la banda m.
K_{n+1}	Coeficiente de recesión que indica la disminución del caudal en el tiempo n respecto del anterior, donde $K_{n+1} = x \cdot Q_n^{-y}$, donde x e y son parámetros a calibrar.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1-1
1.1 Generalidades.....	1-1
1.2 Objetivos	1-2
1.3 Contenido del Informe.....	1-3
2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS Y TEÓRICOS PARA EL DESARROLLO DE MODELOS.....	2-1
2.1 Generalidades.....	2-1
2.2 Modelos de tipo estadísticos	2-1
2.3 Revisión de información en relación a modelos con base física	2-2
2.3.1 Descripción breve de modelos.....	2-2
2.3.2 Selección de Modelo a Emplear	2-8
2.3.3 Caracterización modelo SRM.....	2-10
2.4 Estadística empleada para verificar la bondad del ajuste.....	2-11
2.4.1 Coeficiente de Determinación (R^2).....	2-11
2.4.2 Error Estándar	2-12
2.4.3 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (N.S.).....	2-12
3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA E INFORMACIÓN BÁSICA DISPONIBLE	3-1
3.1 Caracterización de la cuenca en análisis.....	3-1
3.2 Información Base Disponible	3-2
3.2.1 Antecedentes Cartográficos e Información Satelital	3-3
3.2.2 Antecedentes Fluviométricos	3-3
3.2.3 Antecedentes Meteorológicos	3-4
3.3 Antecedentes de Ruta de Nieve (equivalente en agua).....	3-5
4. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA BÁSICA	4-1
4.1 Análisis de Información Fluviométrica.....	4-1
4.1.1 Tendencias Información Fluviométrica.....	4-1
4.1.2 Determinación Curvas de Variación Estacional.....	4-2
4.2 Análisis de Información Pluviométrica.....	4-3
4.2.1 Tendencias Información Pluviométrica.....	4-3
4.2.2 Análisis de Frecuencias Series de Precipitaciones Acumuladas Oct-Mar	4-4
4.3 Análisis de Temperatura	4-5
4.4 Análisis de Cubierta de Nieve	4-6
4.5 Selección del Periodo de Análisis.....	4-7

5. DESARROLLO DE MODELOS DE TIPO ESTADÍSTICOS	5-1
5.1 Variables de Ajuste	5-1
5.2 Confección de Modelos Estadísticos	5-3
5.3 Resultados	5-6
5.4 Análisis de los Resultados	5-9
6. CALIBRACIÓN DE MODELO SRM	6-1
6.1 Generalidades	6-1
6.2 Consideraciones Generales	6-1
6.3 Proceso de Calibración/Validación del Modelo	6-3
6.3.1 Calibración del Modelo	6-3
6.3.2 Validación del Modelo	6-6
6.4 Análisis de los Resultados	6-7
6.5 Recomendaciones para Aplicación del Modelo SRM	6-8
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL ANÁLISIS	7-1
7.1 Consideraciones Generales	7-1
7.2 Conclusiones del Análisis de Modelos Estadísticos	7-2
7.3 Conclusiones del Análisis del Modelo SRM	7-3
7.4 Conclusiones y Recomendaciones Finales	7-5

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A	CARACTERIZACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA
Anexo A.1	Caracterización Pluviométrica
Anexo A.2	Caracterización Fluviométrica
Anexo A.3	Determinación de la Cobertura Nival
Anexo A.4	Información de Temperaturas
ANEXO B	RESULTADOS DE MODELOS ESTADÍSTICOS
ANEXO C	RESULTADOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO SRM

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Durante años se han realizado pronósticos de caudales de deshielos, los cuales permiten realizar una adecuada planificación de los recursos hídricos disponibles, principalmente para la gestión de los sistemas de riego y generación eléctrica.

En general estos pronósticos están basados en modelos estadísticos y en la experiencia acumulada por los distintos profesionales que realizan el trabajo. Debido a las variaciones climáticas observadas durante los últimos años, se hace cada vez más difícil predecir el aporte hídrico de las cuencas, asociado principalmente a los cambios macro climático que afectan especialmente la cantidad y calidad de nieve acumulada durante el invierno, las temperaturas y precipitaciones líquidas.

Por otro lado, según estudios realizados por varios autores (Martinec¹ et al. 1983, 1991; Baumgartner² et al. 1987) el área cubierta por nieve es un gran indicador de la magnitud del recurso hídrico disponible, pero ésta se encuentra asociada a otros factores como son la temperatura del manto y la radiación solar incidente, que a su vez se ven influenciadas por condiciones propias de la cuenca como son la orientación, pendiente y altura de la misma.

Según los avances tecnológicos con información disponible de manera casi instantánea, se hace posible contar con datos actuales que permiten ampliar la gama de alternativas de análisis para los pronósticos de caudales de deshielo. Esta información está asociada principalmente a la observación satelital y la determinación de la cobertura nival en las cuencas de estudio, además de la información actual de temperatura, caudal, lluvia y rutas de nieve.

¹ Martinec J., A. Rango y E. Major. The Saowmelt-Runoff Model SRM Usera Manual. NASA, fleference Publication 1.100, 1983.

² Baumgartner, M. F., Seidel, K. and Martinec, J. (1987) Toward snowmelt runoff forecast based on multisensor remote sensing information, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol GE-25 N°6, Nov 1987.

1.2 Objetivos

Con la información disponible se propone el desarrollo de modelos para la simulación de caudales de deshielo en la cuenca del río Maule, subcuenca río Melado. La región del Maule destaca por su gran producción eléctrica y necesidad de riego, para lo cual es necesario una correcta planificación de los recursos hídricos durante la temporada de deshielo (octubre-marzo). Se selecciona esta subcuenca por su gran aporte de caudal al río Maule (en torno al 50%), el régimen nivo-pluvial que permite estudiar el aporte de la cobertura nival y su incidencia en la producción de caudal.

Los modelos a desarrollar corresponden a los siguientes tipos:

- **Modelos estadísticos**, basado en regresiones multilíneal con componentes autoregresivas, los cuales permiten definir el volumen total de escorrentía de la temporada de deshielo. Para el desarrollo de estos modelos se propone utilizar información de precipitación, rutas de nieve y caudal observado, y además se incorpora la variable de cobertura nival, la cual se obtiene a partir de imágenes satelitales disponible a través de la página de internet de la NASA. Con esta información se confeccionan diferentes modelos para estimación de caudales de deshielo, considerando la información disponible y las distintas combinaciones de variables indicadas anteriormente.
- **Modelo del tipo fusión de nieve**, el modelo propuesto corresponde a “Snowmelt Runoff Model” (SRM) el cual corresponde a una herramienta computacional destinada a la modelación y simulación del caudal medio diario en cuencas montañosas. El modelo fue desarrollado por Martinec (1975) para el pronóstico de caudales en pequeñas cuencas de Europa, cuyas características son montañosas; no obstante, ha sido aplicado en cuencas de gran tamaño gracias al desarrollo de imágenes satelitales, desde las cuales es posible obtener datos de cobertura nival.

El modelo SRM incluye las variables de precipitación, cobertura nival y temperatura, todos a nivel diario; además se debe contar con la información del caudal (también a nivel diario) para realizar el proceso de calibración y validación del modelo.

El principal objetivo de trabajo corresponde tener distintos modelos calibrados que permitan estimar los caudales de deshielo según las condiciones meteorológicas específicas de la cuenca.

1.3 Contenido del Informe

El presente documento está dividido en 7 capítulos y 3 anexos según se describe a continuación.

El Capítulo 2 incluye una revisión de antecedentes bibliográficos y teóricos para el desarrollo de modelos, una breve descripción de los modelos de precipitación-escorrentía disponibles, la selección del modelo a emplear y los parámetros de bondad de ajuste usados para la evaluación de los modelos.

El Capítulo 3 presenta la descripción de la cuenca y la información básica empleada para el desarrollo de los modelos, lo cual corresponde a información de precipitación, caudales, ruta de nieve, cobertura nival y temperatura de distintas estaciones de medición. El detalle de los datos se encuentra en el Anexo A.

En el Capítulo 4 el análisis de la información hidrometeorológica básica disponible, lo incluye un análisis de tendencias de precipitaciones, caudales y temperaturas, además de la determinación de la cobertura nival. En este capítulo también se incluye la selección del periodo de análisis para el desarrollo de los modelos.

El Capítulo 5 presenta el desarrollo de los modelos estadísticos para la estimación de caudales, basados en regresiones multilíneal con componentes autoregresivas. En Anexo B se presenta el detalle del desarrollo y resultados de los modelos de este tipo.

En el Capítulo 6 se presenta el análisis empleando un modelo de fusión nieve-escorrentía, correspondiente al modelo SRM (Snowmelt Runoff Model) el cual es una herramienta computacional destinada a la modelación y pronóstico del caudal medio diario en cuencas montañosas. El detalle de las calibraciones y validaciones se encuentran en el Anexo C.

Finalmente en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones y recomendaciones del análisis.

2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS Y TEÓRICOS PARA EL DESARROLLO DE MODELOS

2.1 Generalidades

Los modelos de simulación de caudales corresponden a una representación de la realidad mediante relaciones matemáticas y/o reglas de operación de variables independientes que interactúan entre sí para la generación artificial de caudales.

Existen una gran variedad de modelos disponibles, los cuales pueden presentar diferentes grados de dificultad de aplicación, tanto en los variables de entradas a nivel diario, mensual o la temporada en estudio, como en las relaciones matemáticas utilizadas (que pueden dificultar el proceso de calibración).

El presente capítulo presenta una breve descripción de los modelos de tipo estadístico y de precipitación-escorrentía disponibles, y la elección del modelo para estimar los caudales de deshielo.

2.2 Modelos de tipo estadísticos

Los modelos desarrollados de tipo estadístico, están basados en regresiones multilíneas con componentes autoregresivas, que permiten corregir y/o ajustar la fase recesiva de los hidrogramas de deshielo. Para ello se utiliza el método de "mínimos de cuadrados" para calcular la expresión de mejor ajuste, según se señala a continuación:

$$y = m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + \dots + m_n \cdot x_n + b$$

Donde:	y:	Caudal simulado.
	m_1, m_2, m_n :	Coeficiente de ponderación del valor x respectivo.
	x_1, x_2, x_n :	Valor de la variable conocida.
	b:	Constante.

En el capítulo 5 se desarrollan los modelos propuestos y se indican las variables utilizadas en ellos.

2.3 Revisión de información en relación a modelos con base física

A continuación se presenta una breve revisión de modelos hidrológicos con base física, la elección del modelo seleccionado y una caracterización de éste.

2.3.1 Descripción breve de modelos

A continuación se muestra una descripción breve de los modelos hidrológicos utilizados.

- **Snow-17**

El modelo Snow-17 es una herramienta conceptual que permite calcular la acumulación y ablación de nieve. Es un modelo que simplifica los procesos físicos que alteran la evolución del manto nival. Utiliza como entrada la temperatura del aire, la precipitación y el área cubierta de nieve. Una de las ventajas de este modelo es que utiliza pocas variables para la simulación de los procesos físicos de la columna de nieve. Este modelo tiene su nacimiento en los modelos descritos por Anderson y Crawford (1964) y Anderson (1968).

- **WEAP**

Weap es un modelo creado por el Stockholm Environment Institute, el cual provee de un enfoque integral para la planificación de recursos hídricos. El modelo calcula la demanda, oferta, escurrimiento, infiltración, requisitos para las cosechas, flujos y almacenamiento de agua entre otras variables. Una de las principales virtudes es su amigable interfaz, la cual permite operar el modelo de una manera gráfica y sencilla. Además, es posible enlazarlo con otros modelos como MODFLOW, MODPATH, EXCEL, etc.

WEAP posee tres módulos o algoritmos para simular escurrimiento (precipitación/escurrimiento, demandas de riego y humedad del suelo). En WEAP es posible dividir la cuenca en subcuencas más pequeñas, no obstante estas subcuencas no interactúan entre sí y los caudales son vertidos directamente a la red de drenaje.

Para la utilización y activación del modelo se necesita de una licencia, la cual varía su valor dependiendo si su uso será para educación, investigación o consultoría. Para el último caso se debe tener un permiso especial entregado por sus creadores.

- FTXZ

FTXZ es un modelo de función de transferencia. Esto implica que las variables de entrada provocan una respuesta desfasada en el tiempo en la variable de estudio. Este tipo de modelo fue utilizado por la Universidad de Chile-DGA, en el estudio “Investigación de nieves y escorrentía de deshielo en la cuenca alta del río Aconcagua. Aplicación de modelos de simulación nival y de pronóstico de volúmenes de deshielo, SIT 165, Diciembre 2008”.

El tipo de información de entrada pueden ser variables autoregresivas que representan las inercias del sistema, exógenas e independientes que son aquellas que pueden representar una condición de borde del sistema.

- MSND

El modelo MSND es un modelo creado por la Universidad de Chile. Se basa en una ecuación de balance de energía, la cual se evalúa en una malla sobre el área de estudio. Las variables meteorológicas de entrada se obtienen de un modelo de pronóstico a gran escala como por ejemplo el Weather Research & Forecasting Model (WRFM).

Para la utilización del modelo se debe disponer de información topográfica, la cual debe ser preprocesada, junto con los datos meteorológicos, para luego calcular la temperatura en superficie, definir los indicadores del modelo y realizar el cálculo de calor neto sobre el manto nival. Una vez efectuados estos cálculos se procede con la simulación de la metamorfosis del manto que recibe y no recibe precipitación sólida para procesar el estado del manto nival en el tiempo siguiente.

- TopoFlow

TopoFlow es un modelo distribuido y modular, el cual simula procesos hidrológicos usando distintas variables meteorológicas. Para su utilización se requiere de un mapa de elevación de elementos regulares, en donde se calculan los procesos hidrológicos.

El modelo posee módulos de derretimiento de nieves, evapotranspiración, infiltración-percolación, flujo subsuperficial y superficial.

Algunas de sus limitaciones están en la modelación del flujo superficial, el cual es actualmente modelado de una manera no convencional, donde se utiliza una rutina de ruteo basado en la onda dinámica y difusa. Además, el modelamiento de los flujos entre la zona saturada y no saturada no está lo suficientemente desarrollado.

- HydroFOSS

Este modelo fue diseñado para modelar una cuenca en la frontera entre Italia y Suiza con condiciones alpinas. HydroFOSS es un modelo distribuido de base física, modular y continuo. Es una combinación de varios módulos que describen distintos procesos de precipitación-escorrentía. Los procesos son desarrollados en GIS GRASS lo que permite el manejo de información heterogénea y ayuda a la integración de todos los datos. HydroFOSS es resultado de la elaboración de distintos módulos en GRASS como de evaporación, intercepción de la vegetación, derretimiento y acumulación de nieve y cálculo de escorrentía. Cabe destacar que HydroFOSS es un software de código libre.

Las ventajas de HydroFOSS radican en la facilidad de manejar los módulos y definir la interacción entre ellos, es fácilmente enlazable a otros modelos, es de código abierto, por lo que es fácilmente accesible y presenta resultados confiable en cuando a la visualización de la dinámica de la cuenca y evaluación de riesgos.

- Topmodel

Topmodel es un modelo de base física, distribuido, que simula los flujos a través de una cuenca. Es capaz de simular el flujo superficial, infiltración, saturación, flujo subsuperficial, evaporación y el ruteo de caudales. El modelo simula las interacciones entre el agua subterránea y superficial estimando el nivel piezométrico, desde el cual se estima donde se desarrollan las zonas saturadas y las que tienen el potencial de producir flujo superficial debido a la sobre saturación del suelo.

Los datos de entrada del modelo son la precipitación, la evapotranspiración potencial y la serie de caudales observados. Además es necesario incorporar una matriz con información de elevación.

Topmodel está integrado en la plataforma GRASS GIS versión 5 bajo la instrucción `r.topmodel`.

Algunos de los mayores problemas son la definición de la grilla. El modelo es sensible al tamaño de la grilla empleada. En particular se recomienda que esta sea menor a 50 m, lo cual puede ser complejo de implementar en cuencas de un tamaño importante.

- VIC

VIC es un modelo semi-distribuido utilizado para modelar cuencas de gran tamaño. Se utiliza una malla uniforme mayor a 1 km. La simulación se efectúa a escala diaria o menor a un día.

En VIC existe una grilla que da cuenta de información topográfica, lo que permite incorporar el efecto orográfico de la precipitación y gradientes de temperatura, con lo que se logra una mejor simulación en zonas montañosas. Las grillas creadas en VIC permiten dar cuenta de la heterogeneidad de la vegetación, contar con múltiples capas con infiltración variable y un flujo base no lineal. Cabe destacar que las grillas se simulan independientemente.

VIC posee un módulo de nieves, el cual simula la cobertura nival de variadas formas, como manto nival, nieve depositada en la vegetación y sobre lagos de hielo. El manto de la cobertura nival se simula en dos capas, donde la zona más alta se considera separada para el cálculo del balance de energía.

El caudal es simulado en un modelo de rastreo separado de la modelación de las grillas, el cual se basa en una función de transferencia, donde se utilizan las ecuaciones de Saint Venant.

VIC utiliza información meteorológica tal como precipitación, temperatura, velocidad del viento, presión de vapor, radiación de onda corta y onda larga, y presión de vapor.

- CRHM

El modelo CRHM fue desarrollado por la Universidad de Saskatchewan en Canadá. La unidad de modelación es la HRU (Hydrologic Response Unit) la cual discretiza el área de estudio en unidades respecto a una o varias características de la cuenca, subcuencas o zonas, definidas por el modelador. CRHM es una herramienta diseñada para modelar cuencas ubicadas en zonas frías donde la acumulación de nieve es importante, aunque su versatilidad le permite funcionar bien en otros tipos de cuencas.

El modelo permite la simulación de los procesos de fusión y acumulación del manto nival, infiltración, balance de humedad del suelo, evapotranspiración, balance energético, intercepción de la vegetación y sublimación, transporte de nieve y rastreo de flujos superficiales y subterráneos.

El modelo CRHM ha sido calibrado con éxito en cuencas ubicadas en zonas frías, donde se han logrado buenos índices de ajuste entre el caudal modelado y observado. Esto se ha logrado producto de la flexibilidad del modelo, una base física sólida y lo robusto de los algoritmos.

- SRM

El modelo SRM (Snowmelt Runof Model o Modelo de Escorrentía de Nieve Fundida) es una herramienta que simula escorrentía en base al derretimiento de nieve el cual fue desarrollado por Martinec (1975). Está especialmente diseñado para simular el caudal en zonas montañosas y frías. El modelo se ha aplicado a cuencas de prácticamente cualquier tamaño (desde 0.76 km² hasta 120000 km²) y cualquier rango de alturas.

Las variables de entrada del modelo son la precipitación, temperatura y cobertura nival. La simulación se realiza por bandas, las cuales pueden definirse mediante alguna herramienta GIS o por una curva hipsométrica.

La simulación del derretimiento de nieve se hace bajo el concepto de grado día. De este modo, el derretimiento depende directamente de la temperatura de la banda y del parámetro grado día, que define la lámina de agua que se derrite por día por grado Celsius.

- PRMS

El modelo PRMS (Precipitation Runoff Modeling System o Sistema de Modelamiento de Precipitación y Escorrentía), fue desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS. PRMS es un modelo semi-distribuido con base física, diseñado para simular el balance de agua en una cuenca sobre una base continua. Todos los procesos hidrológicos relevantes en la interacción atmósfera-vegetación-suelo son incluidos en el modelo, que fue desarrollado para evaluar los efectos de varias combinaciones de geomorfología, tipo y uso de suelo, vegetación y parámetros climáticos sobre la respuesta hidrológica de la cuenca. La respuesta a la precipitación como lluvia y nieve, en forma regular, y a la de eventos extremos de precipitación, puede ser simulada para evaluar cambios en las condiciones del balance hídrico, los regímenes de flujo, los caudales extremos y volúmenes, las relaciones entre suelo y agua, y la recarga en agua subterránea.

La fuente de energía se encuentra asociada a un proceso de balance radiativo y como

tal simula el comportamiento físico de la cuenca.

A diferencia de la mayoría de los modelos anteriores, el modelo PRMS utiliza el concepto de HRU para efecto de seleccionar áreas de comportamiento homogéneo que intervienen en el proceso de deshielo.

2.3.2 Selección de Modelo a Emplear

La selección del modelo hidrológico se basara en los siguientes criterios:

- 1) Sistema operativo en el cual se ejecutan los modelos
- 2) Licencia disponibles
- 3) Disponibilidad del modelo al tiempo de modelación
- 4) Módulos que representen mejor la cobertura nival
- 5) Módulos de simulación de los procesos físicos de la cuenca
- 6) Interfaz gráfica fácil de utilizar
- 7) Material disponible con información de los modelos

A modo de facilitar la decisión se presenta la siguiente tabla resumen:

Tabla 2.1 Resumen de modelos estudiados

Modelo	Sistema operativo	Licencia	Unidad hidrológica	Creadores
Snow-17	Windows	No disponible	Sin unidades	NWSRFS
WEAP	Windows	Con cargo. Requiere autorización para uso no académico	Bandas	Instituto del medio ambiente de Stockholm
FTXZ	Windows	No disponible	Sin unidades	Universidad de Chile
MSND	Sin información	No disponible	Grilla	Universidad de Chile
Topoflow	Unix – Linux – Mac OS - Windows	Código abierto	Grilla	Universidad de Colorado
HydroFOSS	Windows- Linux	Código abierto	Modular	Universidad politécnica de Milán

Modelo	Sistema operativo	Licencia	Unidad hidrológica	Creadores
Topmodel	Windows-Linux	Código abierto	Grilla	Lancaster University
VIC	Linux – Unix (Windows a través de un emular)	Código abierto	Grilla	Universidad de Washington
CRHM	Windows	Código abierto	HRU	Universidad de Saskatchewan
SRM	Windows	Código abierto	Bandas	United states department of Agriculture
PRMS	Windows – Linux	Código abierto	HRU	USGS

En relación a los demás modelos analizados, cabe hacer los siguientes comentarios:

Se descartaron los modelos con dificultades en la obtención de la licencia o que no sean de código abierto: Snow-17, WEAP, FTXZ y MSND.

No se consideraron los modelos HydroFOSS y Topmodel debido a que utilizan como base para ser ejecutados la plataforma GRASS GIS, que posee una interfaz de usuario rústica y una difícil curva de aprendizaje.

De los modelos restantes, se descarta el modelo VIC el cual se necesita de un emulador para ser ejecutado en Windows, ya que los sistemas operativos donde trabaja es en Linux y Unix, lo que dificulta su aplicación. El modelo Topoflow no se considera por sus limitaciones para modelación el flujo superficial. El modelo CRHM no permite una visualización clara de las variables modeladas en una serie de paneles y sus manuales y tutoriales son difíciles de obtener.

Para el modelo PRMS se deben calibrar 8 parámetros, mientras que 5 deben ser estimados: almacenamiento máximo en la zona de raíces, cobertura vegetal en invierno y verano, e intercepción de la vegetación en invierno y verano (Dagnachew et al., 2003), lo cual dificulta su uso y la validación de las estimaciones de los 5 parámetros indicados.

Finalmente queda el modelo SRM, el cual presenta variables de fácil obtención con resultados aceptables en otras cuencas del país, el cual se usa para el desarrollo de este trabajo. Una dificultad de operación radica en que se debe conocer la evolución de la cubierta de nieve en el tiempo, la cual es posible de solucionar a través de la información de tipo satelital disponible a través de los medios tecnológicos actuales.

2.3.3 Caracterización modelo SRM

El modelo SRM puede ser aplicado a cuencas de diverso tamaño (desde 0,76 a 917,444 km²) y para cualquier rango de elevaciones. Las variables de entrada del modelo son la precipitación, temperatura y cobertura nival.

El modelo permite la generación de bandas donde se evalúan las variables de entrada para realizar el cálculo del caudal. La cantidad de bandas a emplear depende del modelador.

El modelo calcula el caudal en el tiempo n+1 empleando la ecuación indicada más abajo. En ella se muestra un modelo de “m” bandas, en donde el subíndice “n” identifica el tiempo “n” de la modelación.

$$Q_{n+1} = \sum_{i=1}^m (C_{Smn} \cdot a_{mn} \cdot (T_n + \Delta T_{mn}) \cdot S_{mn} + C_{Rmn} \cdot P_{mn}) \cdot \frac{A_m \cdot 1000}{86400} \cdot (1 - K_{n+1}) + Q_n \cdot K_{n+1}$$

Donde:

- a_{mn} : Factor grado día en (cm·°C⁻¹·d⁻¹).
- C_{Rmn} : Coeficiente de escorrentía para la lluvia
- C_{Smn} : Coeficiente de escorrentía para la nieve
- S_{mn} : Porcentaje de cobertura nival
- T_n : Numero de grado-días [°C·d]
- ΔT_{mn} : Variación de temperatura desde la estación base a la banda para ajustar T cuando solo se disponen de datos en una estación meteorológica.
- A_m = Área de la banda m
- Q_n = Caudal en el tiempo n
- P_{mn} : Precipitación en la banda m

K_{n+1} : Coeficiente de recesión que indica la disminución del caudal en el tiempo n respecto del anterior, donde $K_{n+1} = x \cdot Q_n^{-y}$, donde x e y son parámetros a calibrar.

El concepto grado día está relacionado con la energía requerida para el proceso de fusión de nieve, el cual en esta aplicación se encuentra asociado con la densidad del manto y la temperatura requerida para que se produzca la fusión.

Dado que el pronóstico se desarrolla por bandas, se requiere definir un gradiente de manera de establecer la temperatura disponible según altitud de cada banda.

Por otro lado, se requiere conocer la superficie de la cobertura nival y su evolución en el tiempo, la cual se obtiene de imágenes satelitales, según se explica en el capítulo 3.

2.4 Estadística empleada para verificar la bondad del ajuste

La evaluación de los modelos desarrollados se realizará en base a los siguientes índices de bondad de ajuste.

2.4.1 Coeficiente de Determinación (R^2)

Expresa la dependencia lineal entre dos variables que, en este caso, son los caudales observados y los caudales simulados. Se formula a través de la siguiente expresión:

$$R^2 = \frac{S_{obs, sim}^2}{S_{obs} \cdot S_{sim}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})(Q_i^{sim} - \bar{Q}^{sim}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - \bar{Q}^{sim})^2}$$

Donde

$S_{obs, sim}$	Covarianza sin sesgo entre los caudales observados y simulados.
S_{obs} y S_{sim}	Varianzas sin sesgo de los caudales observados y simulados.
Q^{obs}	Caudal observado.

$\bar{Q}^{obs}$	Caudal medio observado.
Q^{sim}	Caudal simulado.

El coeficiente de determinación puede tomar valores entre 0 y 1, obteniendo mejor ajuste mientras mayor sea el valor de R^2 .

2.4.2 Error Estándar

Se define como la medida de confianza de la ecuación de estimación que indica la variabilidad de los datos alrededor de la línea de regresión. Este parámetro se indica a continuación:

$$e_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}{n - (k + 1)}}$$

Donde:

- n: Número de caudales observados.
- k: Numero de variables independientes.

Este valor permite la comparación relativa entre los modelos.

2.4.3 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (N.S.)

El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en Hidrología e indica cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, $N.S.=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $N.S.=0$. El índice se define como:

$$N.S. = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2}$$

Adicionalmente se determina el índice de Nash-Sutcliffe asociado al logaritmo de los caudales, lo que permite atenuar los valores peak y evaluar el funcionamiento del modelo enfocado en

los caudales menores.

$$N.S.LN = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_i^{sim}) - \ln(Q_i^{obs}))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_i^{obs}) - \overline{\ln(Q^{obs})})^2}$$

En ambos casos, se considera el siguiente criterio de ajuste según este índice:

Tabla 4.2 Criterio de ajuste (N.S. y N.S.LN)

N.S.	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente. Molnar, 2011

3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA E INFORMACIÓN BÁSICA DISPONIBLE

3.1 Caracterización de la cuenca en análisis

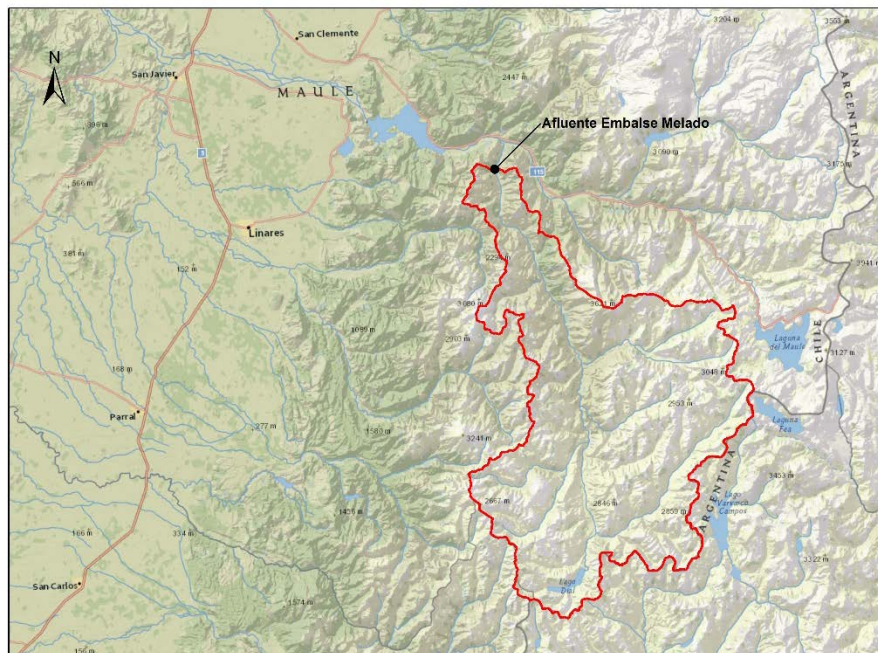
Para el desarrollo de los modelos se utiliza la información de la cuenca afluente al Embalse Melado, la cual corresponde a una cuenca de 2.237 [km²] ubicada entre las cotas 700 y 3.500 [msnm] según la distribución indicada en la curva hipsométrica incluida en la Figura 3.2. En la Figura 3.1 se muestra la ubicación general de esta cuenca, cuyas coordenadas se indican a continuación:

Tabla 3.1: Punto de Descarga Afluente Embalse Melado

Este [m]	Norte [m]
311.179	6.040.761

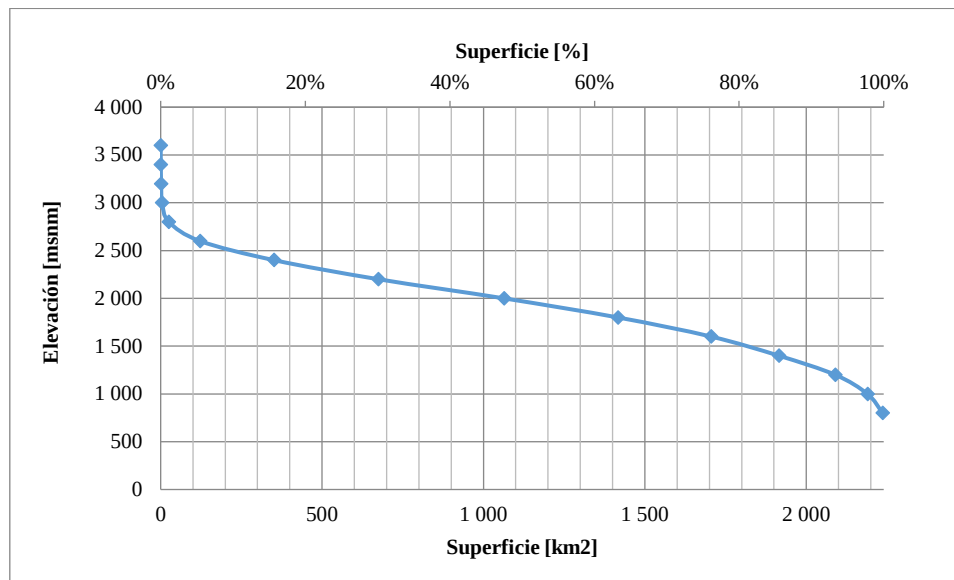
Coordenadas UTM, Datum WGS84

Figura 3.1: Ubicación Cuenca Afluente Embalse Melado



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.2: Curva Hipsométrica de la Cuenca Melado en el Salto



Fuente: Elaboración Propia

Esta cuenca presenta un comportamiento nivo-pluvial y tal como se aprecia en la curva hipsométrica anterior, presenta una superficie aproximada de 1.000 [km²] sobre la cota 2.000 [msnm], de manera que acumula una gran cantidad de nieve durante el invierno, del orden del 50% de la cuenca.

3.2 Información Base Disponible

A continuación se muestra una descripción de los antecedentes a utilizar de acuerdo con el tipo de información disponible para la confección de los modelos.

En la Figura 3.3 se presenta un plano con la ubicación general que señala la posición de las estaciones y/o puntos de control que se emplearán en el análisis.

Figura 3.3 Ubicación de las estaciones utilizadas



Fuente: Elaboración Propia

3.2.1 Antecedentes Cartográficos e Información Satelital

Para la información base de los antecedentes cartográficos se utilizó las siguientes planchetas IGM (escala 1:50.000).

Tabla 3.2 Planchetas IGM utilizadas

San Clemente	Central Los Cipreses	Río Melado
Vilches	Baños Campanario	Laguna Sin Puerto
Río Claro	Paso Pehuenche	Bullileo
Panimavida	Achibueno	Baños Longaví
Melado	Nevado de Longaví	Laguna del Dial

Fuente: Instituto Geográfico Militar

3.2.2 Antecedentes Fluviométricos

En la siguiente tabla se muestra la estación utilizada para la obtención de los caudales de deshielo en el punto de control.

Tabla 3.3: Estación fluviométrica utilizada

Nombre	Coordenadas		Elevación [msnm]	Periodo de Información
	Este [m]	Norte [m]		
Afluyente Embalse Melado	311.179	6.040.761	645	1961-2016

Fuente: Centro de Despacho Económico de Carga - Sistema Interconectado Central

Los caudales se obtienen del “Centro de Despacho Económico de Carga Sistema Interconectado Central” (CDEC-SIC), cuya información se encuentra libre y disponible en la página de internet <https://www.coordinadorelectrico.cl>.

En Anexo A.2 se muestra el detalle de los datos y los análisis realizados.

3.2.3 Antecedentes Meteorológicos

a) Precipitación

Los antecedentes básicos empleados para el desarrollo de los modelos, corresponden a las precipitaciones del periodo octubre-marzo. Para lo anterior se usa la información de precipitación de la estación Hornillo, controlada por la Dirección General de Aguas, según se indica a continuación:

Tabla 3.4: Estación pluviométrica utilizada

Nombre	Coordenadas		Elevación [msnm]	Información
	Este [m]	Norte [m]		
Hornillo	308 838	6 028 644	810	1961-Actual
Armerillo	311 869	6 046 881	530	1960-Actual

Fuente: Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea

La información de precipitación de la estación Armerillo se utiliza para generar el gradiente de precipitaciones para su uso en el modelo SRM.

La información de la precipitación se incluye en el Anexo A.1.

b) Temperatura

La estación meteorológica utilizada para obtener registro de temperaturas se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.5 Estaciones meteorológicas usadas en modelo SRM

Estación	Coordenadas		Elevación [msnm]
	Este [m]	Norte [m]	
Colorado	295.409	6.053.566	420

Fuente: Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea

Los valores de temperatura corresponden a valores diarios y se presentan en los gráficos incluidos en el Anexo A.3.

3.3 Antecedentes de Ruta de Nieve (equivalente en agua)

Para la determinación del equivalente en agua se usa la información de ruta de nieve, según se indica a continuación:

Tabla 3.6: Rutas de nieve utilizadas

Nombre	Coordenadas		Elevación [msnm]
	Este [m]	Norte [m]	
Meseta Barroso	352 535	6 054 331	2 344

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se presentan los valores de equivalente en agua para la ruta de nieve indicada:

Tabla 3.7 Equivalente en agua ruta de nieve Meseta Barroso [mm]

Temporada	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
1967/68	339	470	615	-	-
1968/69		74	43	-	-
1969/70	455	716	798	511	173
1970/71	455	-	-	-	-
1971/72	-	879	-	-	-
1972/73	-	-	-	1496	1222
1973/74	742	820	846	869	231
1974/75	1054	1092	1128	1039	249
1975/76	1006	1240	1199	952	292
1976/77	320	384	343	368	-
1977/78	724	1311	1234	1300	544
1978/79	-	993	1311	960	411
1979/80	-	556	681	841	165
1980/81	448	709	328	157	-
1981/82	340	404	413	427	-
1982/83	-	1396	1228	1789	-
1983/84	713	780	914	97	-
1984/85	948	1515	1587	1500	1238
1985/86	297	313	319	-	60
1986/87	658	774	764	516	8
1987/88	457	893	1038	1073	311
1988/89	406	551	823	-	840
1989/90	165	403	782	512	s/nieve
1990/91	45,3	207	340	327	-
1991/92	403	646	474	543	-
1992/93	1126	1088	1374,5	1208	477
1993/94	760	870	909,1	558	-
1994/95	470	883	836,4	695	-
1995/96	607	1003	997,3	931,8	-
1996/97	240	348	410	-	-
1997/98	820	913	1134	1322	754
1998/99	46,4	0	69	-	-
1999/00	448	525	1199	1060	285
2000/01	971	983,7	1370	1081	-
2001/02	695	861	1138	899	-
2002/03	604	1211	1641	1403	-
2003/04	383	348	267	-	-
2004/05	292	386	396	-	-
2005/06	1085	1252	1707	1430	-
2006/07	634	984	1095	-	-
2007/08	-	756	727	-	-
2008/09	316	687	862,4	-	-
2009/10	496	792	921	-	-
2010/11	447	475	493	-	-
2011/12	302	460	731	-	-
2012/13	307	342	202	-	-
2013/14	466	633	432	-	-
2014/15	490	701	857	-	-
2015/16	305	572	530	-	-

FUENTE: DGA.

4. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA BÁSICA

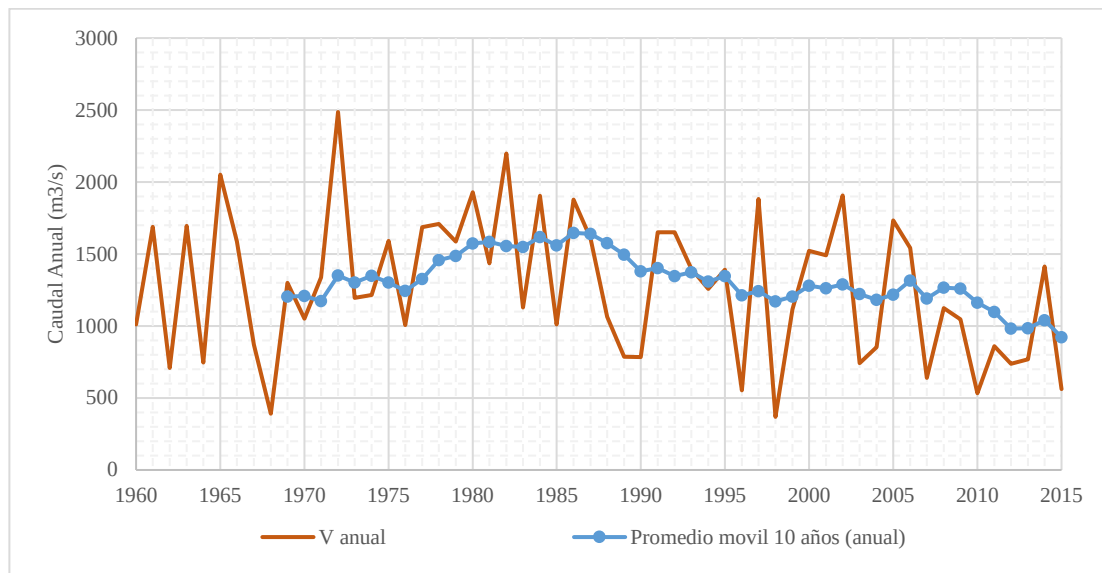
4.1 Análisis de Información Fluviométrica

4.1.1 Tendencias Información Fluviométrica

En el presente estudio se consideró el Análisis de Tendencia de las series de caudales, con el objeto caracterizar la información fluviométrica de la cuenca y el efecto de los últimos años en la generación y distribución estacional del caudal.

En la Figura 4.1 se presenta la serie de caudales anuales agregada (Abr-Mar) y el promedio móvil de los últimos 10 años. En ella se observa un fuerte decaimiento en los volúmenes de la serie anual, especialmente a partir del año 1984.

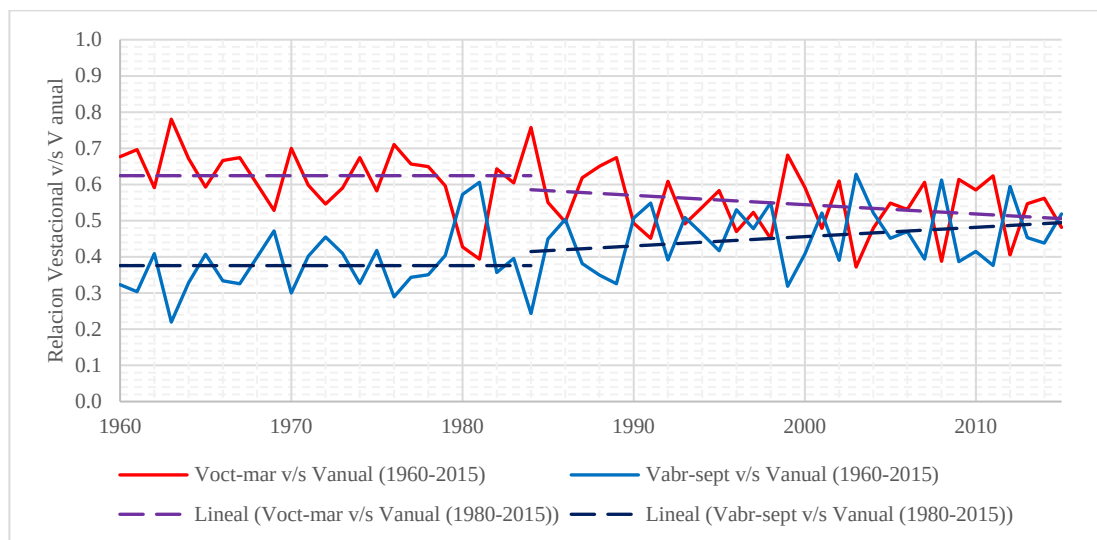
Figura 4.1 Análisis de tendencias promedio móvil caudal anual y estacional



Fuente: Elaboración Propia

Adicionalmente, en cada caso, se procedió a graficar la razón entre el volumen estacional y anual, de manera de establecer la proporción entre ambas y detectar algún cambio de patrón en las series analizadas el cual podría estar atribuido a la influencia de un cambio climático global.

Figura 4.2 Análisis de tendencias razón de volúmenes de escorrentia



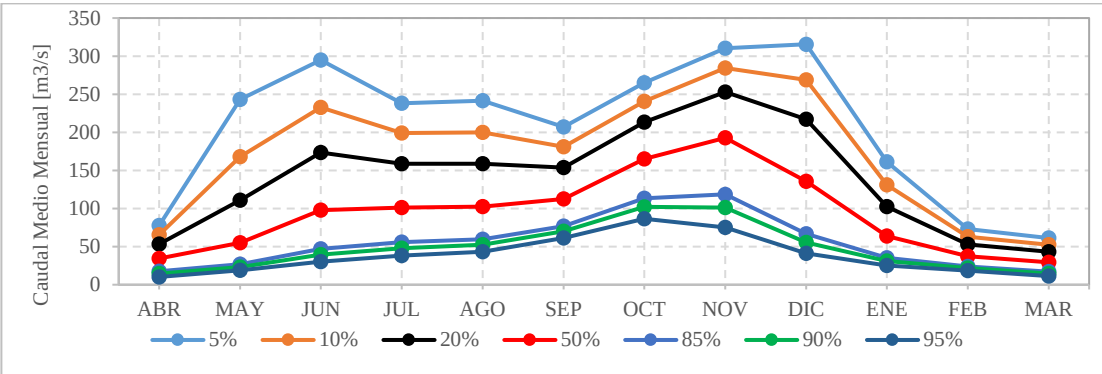
Fuente: Elaboración Propia

De la Figura 4.2, en todos los puntos de pronóstico se diferencian dos periodos: el primero entre 1960 y 1980, en que en general se mantiene la proporción entre los volúmenes de los periodos pluvial y de deshielo; y a contar de este año (1984), en general se observa un cambio en este patrón, caracterizado por un incremento en la fracción pluvial, con el correspondiente decrecimiento en la fracción de deshielo.

4.1.2 Determinación Curvas de Variación Estacional

Sobre la base del análisis de frecuencias de las series mensuales, se obtuvieron curvas de variación estacional para el punto de control, considerando probabilidades de excedencia de 5, 10, 20, 50, 85, 90 y 95%. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.3 y se observa que los caudales peak se genera principalmente en el mes de noviembre.

Figura 4.3 Curvas de Variación Estacional Afluyente Embalse Melado



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.1 Caudales medios mensuales

Pexc [%]	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
5%	77.6	243.3	294.9	238.3	241.6	207.1	264.8	310.4	315.6	161.1	73.0	61.2
10%	65.7	168.1	232.5	198.9	199.8	181.0	240.8	284.4	268.9	131.2	63.2	52.4
20%	53.3	110.9	173.5	158.8	158.8	153.7	213.3	252.9	217.2	102.3	52.9	43.3
50%	34.5	54.8	97.8	101.0	102.4	112.6	165.1	192.7	135.6	63.7	37.4	29.4
85%	17.8	26.9	47.0	55.7	59.7	76.7	113.3	118.6	67.0	35.5	24.1	17.1
90%	14.6	23.2	39.3	48.0	52.5	70.0	102.2	101.1	55.5	30.9	21.6	14.7
95%	10.2	19.0	30.1	38.4	43.4	61.2	86.5	75.1	41.3	25.2	18.5	11.5

Fuente: Elaboración Propia

En general la cuenca presenta un deshielo temprano, el cual se relaciona principalmente con la exposición mayoritaria hacia el norte y por otro lado con una altitud relativamente baja, no superando los 4000 [msnm]. Adicionalmente esta cuenca no presenta glaciares.

En Anexo A.2 se muestra el detalle de la determinación de las curvas de variación estacional.

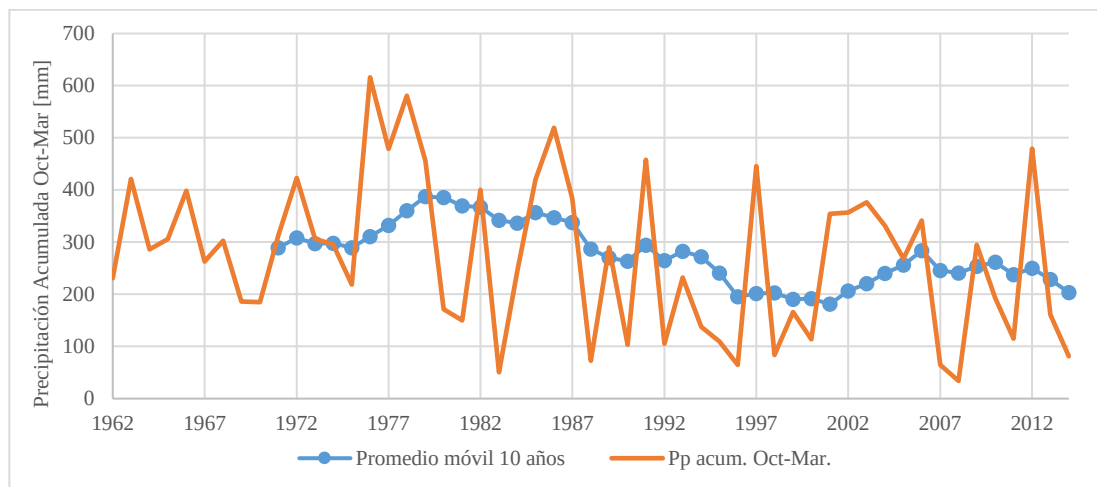
4.2 Análisis de Información Pluviométrica

4.2.1 Tendencias Información Pluviométrica

A continuación se presenta el análisis de tendencia de las series de precipitación acumulada en la temporada de deshielo, con el objeto caracterizar el efecto de los últimos años en la generación y distribución estacional de las precipitaciones.

En la Figura 4.4 se presenta la serie de precipitaciones en la temporada de deshielo y el promedio móvil de los últimos 10 años. En ella se observa un decaimiento en las precipitaciones, especialmente a partir del año 1994.

Figura 4.4 Análisis de tendencias promedio móvil precipitación oct-mar



4.2.2 Análisis de Frecuencias Series de Precipitaciones Acumuladas Oct-Mar

Para el periodo de deshielo (octubre-marzo) se les realiza un análisis de frecuencias, para el cual se utilizan distintas funciones de densidad de probabilidad, como Normal, Pearson, Log-Pearson, Log-Normal, Gumbel y Gamma.

Empleando el test chi – cuadrado como descarte, en conjunto con el análisis gráfico de cada una de las funciones ajustadas (según distribución Weibull), se determinó que la distribución con el mejor ajuste correspondió a la función Log-Pearson. La siguiente tabla muestra los resultados del análisis de frecuencia de la precipitación acumulada en el periodo octubre-marzo:

Tabla 4.2 Resultados Análisis de Frecuencia Pp oct-mar

T [años]	Pexc [%]	Oct.-Mar.
100	1	756
50	2	695
25	4	626
20	5	602
10	10	522
5	20	429
2	50	278
1	95	129
	Distribución	Log-Pearson

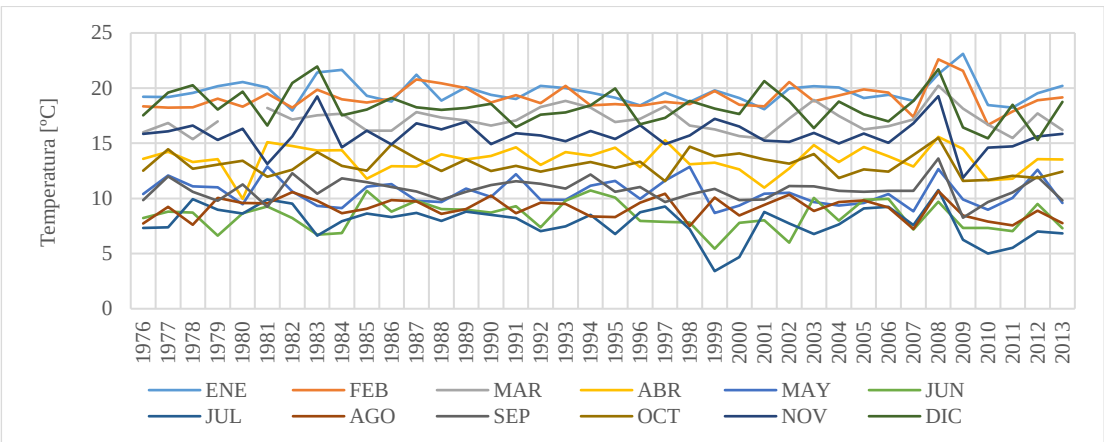
Fuente: Elaboración Propia

En Anexo A.1 se encuentra el detalle de la información pluviométrica para la cuenca en estudio.

4.3 Análisis de Temperatura

La Figura 4.4 muestra las temperaturas medias mensuales para el periodo 1976 a 2013 de la Estación Colorado. En ella no se observa una tendencia en la variación de las temperaturas, solo se observa un peak de temperatura media mensual máxima para todo el año 2008 y un peak de temperaturas media mensual bajas en invierno (junio-julio) de 1999.

Figura 4.5 Temperaturas medias mensuales



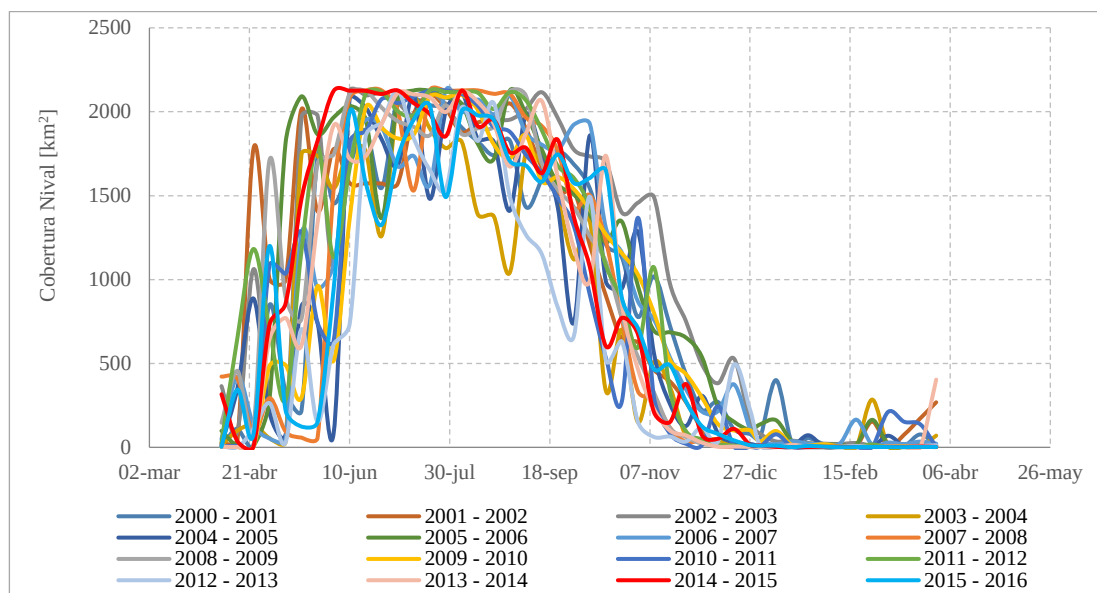
Fuente: Elaboración Propia

4.4 Análisis de Cubierta de Nieve

La cobertura nival se obtiene de imágenes satelitales tipo MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y para extraer la información de cobertura nival desde estas imágenes se implementó una metodología basada en el uso del software ArcGis 10.2.

En la Figura 4.5 se muestra la evolución de la cobertura nival de la cuenca de estudio, donde se observa una cobertura máxima de 2237 [km²] correspondiente a la superficie total de esta cuenca; además, el periodo durante el cual se tiene esta superficie con nieve se extiende desde principio de junio hasta los primeros días de septiembre y posteriormente decae hasta fines diciembre donde casi ya no se observa superficie nevada, excepto en caso puntuales.

Figura 4.6 : Evolución de la Cobertura Nival a Nivel Anual



Fuente: Elaboración Propia

En Anexo A.3 se encuentra el detalle de la metodología empleada para obtener la cobertura nival para la cuenca en estudio y los detalles de los análisis desarrollados.

Tabla 4.3 Cobertura Nival [km²]

AÑO	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.
2000/01	1 433	1 132	435	80	24	5	4
2001/02	1 509	644	270	10	4	2	5
2002/03	1 775	1 399	752	150	26	11	10
2003/04	1 120	336	68	7	3	2	3
2004/05	1 429	947	127	21	4	2	7
2005/06	1 507	1 221	654	105	9	15	13
2006/07	1 772	1 160	346	111	19	16	20
2007/08	1 427	763	32	3	3	2	4
2008/09	1 432	772	62	4	1	2	3
2009/10	1 539	1 157	437	101	9	3	3
2010/11	1 319	275	21	2	1	1	4
2011/12	1 605	880	97	3	2	1	1
2012/13	663	519	35	34	1	1	3
2013/14	1 188	855	71	3	1	1	1
2014/15	1 373	603	150	15	1	2	3
2015/16	1 575	890	274	13	1	1	1

Fuente: Elaboración Propia

4.5 Selección del Periodo de Análisis

Para el análisis comparativo de los modelos propuestos en este estudio es necesario la selección de periodo de análisis común para todas las variables disponibles. Esta restricción se encuentra limitada por la información de cobertura nival disponible de las imágenes satelitales utilizadas (ver Anexo A.3), la cual se encuentra disponible a partir del año 2000.

Adicionalmente a la restricción de información disponible de cobertura nival, el análisis de tendencias realizado a la información de caudales muestran un fuerte decaimiento de ellos durante los últimos 30 años, lo cual se intensifica a partir del año 2005. De igual manera la tendencia de las precipitaciones muestra una disminución en los registros en la temporada de deshielo a partir de la década del 90.

Dado los puntos anteriores, el periodo de análisis correspondiente a los años hidrológicos 2000 a 2015 corresponde a una serie representativa del comportamiento hidrometeorológico de la cuenca en el periodo reciente, el cual podría estar atribuido a la influencia de un cambio climático global.

5. DESARROLLO DE MODELOS DE TIPO ESTADÍSTICOS

Como se mencionó en el capítulo 2, se plantea el desarrollo de modelos de tipo estadístico, basados en regresiones multilíneal con componentes autoregresivas. Para ello se utiliza el método de "mínimos de cuadrados" para calcular la expresión de mejor ajuste, según se señala a continuación:

$$y = m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + \dots + m_n \cdot x_n + b$$

Donde:	y:	Caudal simulado.
	m_1, m_2, m_n :	Coefficiente de ponderación del valor x respectivo.
	x_1, x_2, x_n :	Valor de la variable conocida.
	b:	Constante.

Los modelos que se plantean, en general, pretenden estimar el volumen total de deshielo asociada a la temporada definida por el periodo octubre-marzo.

5.1 Variables de Ajuste

Las variables predictoras corresponden a las siguientes:

Precipitación octubre-marzo ($Pp_{oct-mar}$)

Como su nombre lo dice corresponde a la precipitación acumulada en los meses de deshielo (octubre y marzo). Se usan los valores observados de la Estación Hornillo, indicados en el capítulo 3.

Precipitación abril-septiembre ($Pp_{abr-sept}$)

Corresponde a la precipitación acumulada entre los meses de abril y septiembre. Esta variable no se combina con las variables relacionadas con nieve ya que son dependientes entre sí. Se usan los valores observados de la Estación Hornillo, indicados en el capítulo 3.

Equivalente en agua de la temporada (EA)

Corresponde al valor máximo de equivalente en agua medido en la ruta de nieve entre los meses de julio y septiembre. Se usan los valores de la Estación Meseta Barroso, indicados en el capítulo 3.

Caudal mensual observado de 1, 2 o 3 meses anteriores (Q_{n-1} , Q_{n-2} y Q_{n-3})

Como su nombre lo dice, esta variable se asocia a los caudales medios mensuales de los meses de julio, agosto y/o septiembre, según el modelo. Se usan los valores de la Estación Melado en El Salto, indicados en el capítulo 3.

Caudal máximo del periodo octubre-marzo (Q_{max})

Corresponde al valor máximo del caudal de deshielo observado entre los meses de octubre y marzo para el Estación Melado en El Salto.

Índice de Cobertura Nival

Adicionalmente, se introduce el “**Índice de Cobertura Nival**”, el cual corresponde a un valor que relaciona la cobertura nival obtenida a fines de invierno con el valor máximo de equivalente en agua de la ruta de nieve controlado en la temporada, el cual permite estimar el volumen de agua almacenado en la cobertura nival de la cuenca.

$$ICN = \frac{CN \times H_{Max}}{1.000.000}$$

Donde ICN: Índice de cobertura nival [km³].

CN: Cobertura nival [km²].

H_{max}: Valor máximo de equivalente en agua de la temporada [mm].

5.2 Confección de Modelos Estadísticos

Se confeccionan 21 modelos diferentes para estimación de caudales, considerando la información disponible desde el año 2000 a 2015 y las distintas combinaciones de variables, según se indica a continuación:

a. Modelos Tradicionales de Precipitación y Equivalente en agua

- Modelo 1: Variables Precipitación acumulada abril – septiembre ($Pp_{abr-sept}$).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot Pp_{abr-sept} + b$$

- Modelo 2: Variables Valor máximo de equivalente en agua de la temporada (EA).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot EA + b$$

b. Modelos de Índice de Cobertura Nival, Precipitación y/o Autoregresivos en Caudales

- Modelo 3: Variables Índice de Cobertura Nival (ICN)

$$Q_{sim} = m_1 \cdot ICN + b$$

- Modelo 4: Variables Valor máximo de equivalente en agua de la temporada (EA) y Precipitación acumulada octubre-marzo ($Pp_{oct-mar}$)

$$Q_{sim} = m_1 \cdot EA + m_2 \cdot Pp_{oct-mar} + b$$

- Modelo 5: Variables Índice de Cobertura Nival (ICN) y Precipitación acumulada octubre-marzo ($Pp_{oct-mar}$).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot ICN + m_2 \cdot Pp_{oct-mar} + b$$

- Modelo 6: Variables Valor máximo de equivalente en agua de la temporada (EA), Precipitación acumulada octubre-marzo ($Pp_{oct-mar}$) y Caudal mensual observado del mes anterior (Q_{n-1}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot RN + m_2 \cdot Pp_{oct-mar} + m_3 \cdot Q_{n-1} + b$$

- Modelo 7: Variables Índice de Cobertura Nival (ICN), Precipitación acumulada octubre-marzo ($Pp_{oct-mar}$) y Caudal mensual observado del mes anterior (Q_{n-1}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot ICN + m_2 \cdot Pp_{oct-mar} + m_3 \cdot Q_{n-1} + b$$

- Modelo 8: Variables Valor máximo de equivalente en agua de la temporada (EA), Precipitación acumulada octubre-marzo ($Pp_{oct-mar}$) y Caudal mensual observado de 2 meses anteriores (Q_{n-1} y Q_{n-2}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot EA + m_2 \cdot Pp_{oct-mar} + m_3 \cdot Q_{n-1} + m_4 \cdot Q_{n-2} + b$$

- Modelo 9: Variables Índice de Cobertura Nival (ICN), Precipitación acumulada octubre-marzo ($Pp_{oct-mar}$) y Caudal mensual observado de 2 meses anteriores (Q_{n-1} y Q_{n-2}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot ICN + m_2 \cdot Pp_{oct-mar} + m_3 \cdot Q_{n-1} + m_4 \cdot Q_{n-2} + b$$

c. Modelos de Índice de Cobertura Nival y/o Autoregresivos en Caudales

- Modelo 10: Variables Valor máximo de equivalente en agua de la temporada (EA) y Caudal mensual observado del mes anterior (Q_{n-1}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot EA + m_2 \cdot Q_{n-1} + b$$

- Modelo 11: Variables Índice de Cobertura Nival (ICN) y Caudal mensual observado del mes anterior (Q_{n-1}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot ICN + m_2 \cdot Q_{n-1} + b$$

- Modelo 12: Variables Valor máximo de equivalente en agua de la temporada (EA) y Caudal mensual observado de 2 meses anteriores (Q_{n-1} y Q_{n-2}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot EA + m_2 \cdot Q_{n-1} + m_3 \cdot Q_{n-2} + b$$

- Modelo 13: Variables Índice de Cobertura Nival (ICN) y Caudal mensual observado de 2 meses anteriores (Q_{n-1} y Q_{n-2}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot ICN + m_2 \cdot Q_{n-1} + m_3 \cdot Q_{n-2} + b$$

d. Modelos de Precipitación y /o Autoregresivos en Caudales

- Modelo 14: Variables Precipitación acumulada octubre-marzo ($Pp_{oct-mar}$) y Caudal mensual observado del mes anterior (Q_{n-1}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot Pp_{oct-mar} + m_2 \cdot Q_{n-1} + b$$

- Modelo 15: Variables Precipitación acumulada octubre-marzo ($Pp_{abr-sept}$) y Caudal mensual observado del mes anterior (Q_{n-1}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot Pp_{abr-sept} + m_2 \cdot Q_{n-1} + b$$

- Modelo 16: Variables Precipitación acumulada octubre-marzo ($Pp_{oct-mar}$) y Caudal mensual observado de 2 meses anteriores (Q_{n-1} y Q_{n-2}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot Pp_{oct-mar} + m_2 \cdot Q_{n-1} + m_3 \cdot Q_{n-2} + b$$

- Modelo 17: Variables Precipitación acumulada octubre-marzo ($P_{abr-sept}$) y Caudal mensual observado de 2 meses anteriores (Q_{n-1} y Q_{n-2}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot P_{abr-sept} + m_2 \cdot Q_{n-1} + m_3 \cdot Q_{n-2} + b$$

e. Modelos Autoregresivos en Caudales

- Modelo 18: Variables Caudal mensual del mes anterior (Q_{n-1}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot Q_{n-1} + b$$

- Modelo 19: Variables Caudal mensual de 2 meses anteriores (Q_{n-1} y Q_{n-2}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot Q_{n-1} + m_2 \cdot Q_{n-2} + b$$

- Modelo 20: Variables Caudal mensual de 3 meses anteriores (Q_{n-1} , Q_{n-2} y Q_{n-3}).

$$Q_{sim} = m_1 \cdot Q_{n-1} + m_2 \cdot Q_{n-2} + m_3 \cdot Q_{n-3} + b$$

- Modelo 21: Variables Caudal máximo del periodo octubre-marzo (Q_{max})

$$Q_{sim} = m_1 \cdot Q_{max} + b$$

5.3 Resultados

A continuación en la Tabla 5.1, se presentan los resultados de los modelos descritos anteriormente en la cual se incluyen los índices de bondad de ajuste indicados en el Capítulo 2, a través de los siguientes parámetros:

R^2 :	Coficiente de determinación de la curva de ajuste.
e_y :	Error estándar del caudal estimado.
N.S.:	Eficiencia de Nash-Sutcliffe.

N.S.LN: Eficiencia de Nash-Sutcliffe asociado al logaritmo de los caudales.

% de acierto con error menor a X%: Porcentaje de acierto del caudal estimado con un error menor al X%.

Modelo: Indica si el modelo es Válido o No Válido (se considera un modelo NO VÁLIDO cuando uno de las constante de ponderación del modelo es un valor negativo, dado que en este caso el ajuste dejaría de tener sentido físico)

El detalle de los resultados de los modelos se encuentra en el Anexo B.

Tabla 5.1 Resultados del Modelo Afluyente Río Melado

Modelo			Resultados del Modelo								
			R ²	e _y	N.S.	N.S.LN	% Acierto con error <5%	% Acierto con error <10%	% Acierto con error <20%	% Acierto con error <50%	MODELO
Tipo	ID	Variables									
Cobertura Nival / Precipitación / Autoregresivo en Caudal	1.0	Pp(abr-sept)	0.64	139	0.64	0.59	13%	44%	75%	94%	VÁLIDO
	2.0	EA	0.86	87	0.86	0.81	19%	56%	81%	100%	VÁLIDO
	3.0	ICN	0.91	69	0.91	0.85	38%	69%	88%	100%	VÁLIDO
	4.0	EA-Pp(oct-mar)	0.90	80	0.90	0.86	25%	69%	88%	100%	VÁLIDO
	5.0	ICN-Pp(oct-mar)	0.93	63	0.93	0.91	38%	69%	94%	100%	VÁLIDO
	6.0	EA-Pp(oct-mar)-Q(n-1)	0.92	70	0.92	0.90	44%	81%	88%	100%	VÁLIDO
	7.0	ICN-Pp(oct-mar)-Q(n-1)	0.95	57	0.95	0.94	44%	75%	100%	100%	VÁLIDO
	8.0	EA-Pp(oct-mar)-Q(n-1)-Q(n-2)	0.92	73	0.92	0.90	38%	81%	88%	100%	VÁLIDO
	9.0	ICN-Pp(oct-mar)-Q(n-1)-Q(n-2)	0.95	60	0.95	0.94	44%	75%	100%	100%	VÁLIDO
	10.0	EA-Q(n-1)	0.89	79	0.89	0.85	25%	50%	94%	100%	VÁLIDO
	11.0	ICN-Q(n-1)	0.93	64	0.93	0.88	25%	69%	81%	100%	VÁLIDO
	12.0	EA-Q(n-1)-Q(n-2)	0.90	82	0.89	0.86	19%	44%	94%	100%	VÁLIDO
	13.0	ICN-Q(n-1)-Q(n-2)	0.93	67	0.93	0.88	25%	69%	81%	100%	VÁLIDO
	14.0	Pp(oct-mar)-Q(n-1)	0.55	163	0.56	0.54	13%	38%	69%	94%	VÁLIDO
	15.0	Pp(abr-sept)-Q(n-1)	0.72	129	0.72	0.65	6%	31%	81%	100%	VÁLIDO
	16.0	Pp(oct-mar)-Q(n-1)-Q(n-2)	0.71	137	0.72	0.66	6%	13%	69%	100%	VÁLIDO
	17.0	Pp(abr-sept)-Q(n-1)-Q(n-2)	0.76	123	0.77	0.72	13%	25%	75%	100%	VÁLIDO
Autoregresivo en Caudal	18.0	Q(n-1)	0.54	159	0.55	0.56	13%	31%	69%	94%	VÁLIDO
	19.0	Q(n-1)-Q(n-2)	0.70	134	0.71	0.69	19%	19%	69%	100%	VÁLIDO
	20.0	Q(n-1)-Q(n-2)-Q(n-3)	0.73	131	0.73	0.71	6%	25%	69%	100%	VÁLIDO
	21.0	Q max	0.86	88	0.86	0.82	6%	50%	88%	100%	VÁLIDO

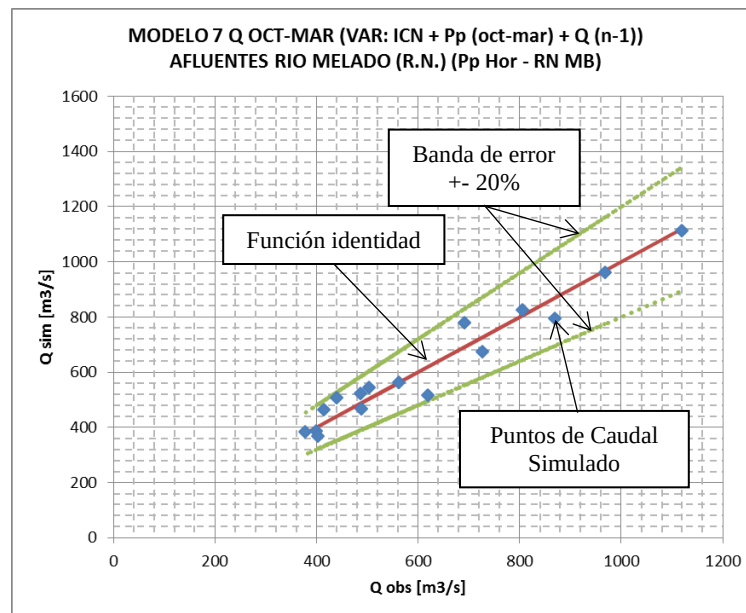
Fuente: Elaboración propia

5.4 Análisis de los Resultados

Del análisis de los resultados dispuestos en la Tabla 5.1 se desprenden las siguientes conclusiones:

- En general, los mejores modelos corresponden a los modelos 5, 6, 7, 8, 9, 11 y 13, los cuales incluyen las variables de Índice de Cobertura Nival (ICN) o Equivalen en Agua (EA), Precipitación oct-mar ($P_{p_{oct-mar}}$) y Caudal mensual observado de 1 y/o 2 meses anteriores (Q_{n-1} y Q_{n-2}). Este análisis se realiza basado en los resultados del coeficiente de determinación de la curva de ajuste y en los valores de la eficiencia de Nash-Sutcliffe.
- De los modelos anteriormente señalados, destacan los modelos 7 y 9, los cuales presentan mejores índices en todos los parámetros evaluados, destacando principalmente el modelo 7, el cual tiene un 100% de acierto con error menor a 20% y un error estándar menor en comparación con el modelo 9.

Figura 5.1 Modelo 7 Q simulado vs Q observado.

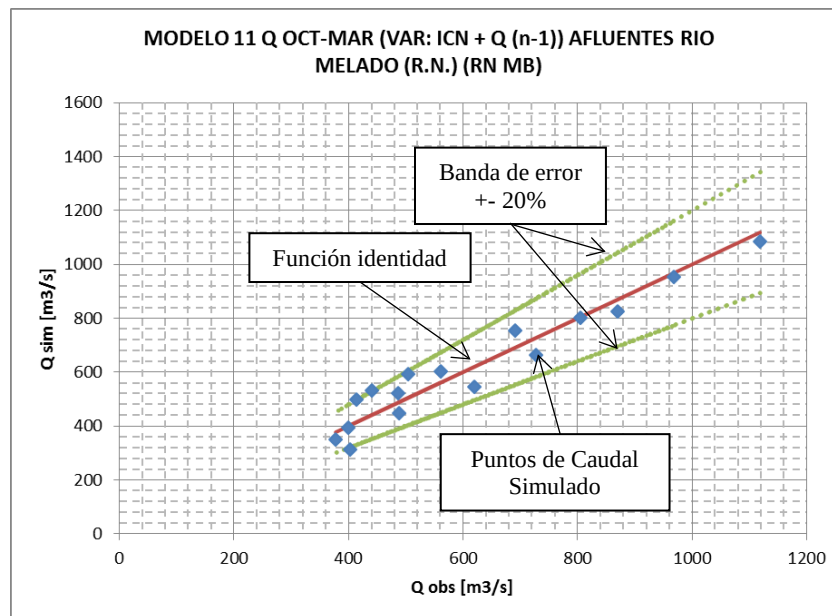


Fuente: Elaboración propia

La dificultad que presenta este modelo desde el punto de vista de desarrollo de pronósticos corresponde a la determinación de la variable de precipitación octubre-marzo. Para realizar la simulación del caudal de deshielo de la temporada, esta variable debe ser estimada, lo cual puede realizarse en base a la predicción estacional realizada por la Dirección Meteorológica de Chile, a través del Boletín de Tendencia Climáticas disponible en la página de internet <http://www.meteochile.gob.cl>.

Dado lo anterior, el modelo 11, cuyas variables corresponden a Índice de Cobertura Nival (ICN) y Caudal mensual observado del mes anterior (Q_{n-1}), parece ser un modelo con un mejor pronóstico de caudales de deshielo.

Figura 5.2 Modelo 11 Q simulado vs Q observado.



Fuente: Elaboración propia

- Para la evaluación del Índice de Cobertura Nival (ICN), se realiza una comparación relativa con los modelos que tienen la variable de Equivalente en Agua (EA). Entre estos modelos se observa una gran similitud en los parámetros de coeficiente de determinación, error estándar y eficiencia de Nash-Sutcliffe, pero se observan mejores resultados en los porcentajes de acierto de los modelos que incluyen la variable de ICN. En la Tabla 5.2 se presentan los modelos en análisis.

De esta manera se puede concluir que la variable de cobertura nival permite realizar un mejor ajuste en los resultados del modelo.

Tabla 5.2 Comparación de modelos ICN v/s RN

Modelo		Resultados del Modelo							
		R ²	e _y	N.S.	N.S.LN	% Acierto con error <5%	% Acierto con error <10%	% Acierto con error <20%	% Acierto con error <50%
ID	Variables								
2.0	EA	0.86	87	0.86	0.81	19%	56%	81%	100%
3.0	ICN	0.91	69	0.91	0.85	38%	69%	88%	100%
4.0	EA-Pp(oct-mar)	0.90	80	0.90	0.86	25%	69%	88%	100%
5.0	ICN-Pp(oct-mar)	0.93	63	0.93	0.91	38%	69%	94%	100%
6.0	EA-Pp(oct-mar)-Q(n-1)	0.92	70	0.92	0.90	44%	81%	88%	100%
7.0	ICN-Pp(oct-mar)-Q(n-1)	0.95	57	0.95	0.94	44%	75%	100%	100%
8.0	EA-Pp(oct-mar)-Q(n-1)-Q(n-2)	0.92	73	0.92	0.90	38%	81%	88%	100%
9.0	ICN-Pp(oct-mar)-Q(n-1)-Q(n-2)	0.95	60	0.95	0.94	44%	75%	100%	100%
10.0	EA-Q(n-1)	0.89	79	0.89	0.85	25%	50%	94%	100%
11.0	ICN-Q(n-1)	0.93	64	0.93	0.88	25%	69%	81%	100%
12.0	EA-Q(n-1)-Q(n-2)	0.90	82	0.89	0.86	19%	44%	94%	100%
13.0	ICN-Q(n-1)-Q(n-2)	0.93	67	0.93	0.88	25%	69%	81%	100%

Fuente: Elaboración propia

- Por otro lado, los modelos relacionados con la precipitación y caudales (modelos 14, 15, 16 y 17) no presentan buenos resultados en los parámetros de análisis. Lo anterior permite inferir indirectamente el buen ajuste que se genera al introducir las variables relacionadas con la nieve (EA o ICN).
- Finalmente los modelos autoregresivos en caudal (modelos 18, 19 y 20) tampoco presentan buenos resultados por sí solos. Solo el modelo 21, el cual es dependiente del caudal medio mensual máximo de la temporada de deshielo, presenta buenos parámetros de ajuste, pero tiene la dificultad que este caudal se genera en los meses de octubre o noviembre, por lo cual tendría que ser una variable estimada para el cálculo del volumen de deshielo.

El detalle de los resultados de los modelos se encuentra en el Anexo B.

6. CALIBRACIÓN DE MODELO SRM

6.1 Generalidades

El modelo “Snowmelt Runoff Model” (SRM) corresponde a una herramienta computacional destinada a la modelación y simulación del caudal medio diario en cuencas montañosas. Fue desarrollado por Martinec (1975) para el pronóstico de caudales en pequeñas cuencas de Europa, con características montañosas; no obstante, ha sido aplicado en cuencas de gran tamaño gracias al desarrollo de imágenes satelitales, desde las cuales es posible obtener datos de cobertura nival. La caracterización y estructura del modelo se indica en el punto 2.2.3 del capítulo 2.

El modelo SRM ha sido sometido a prueba por diversas organizaciones, como por ejemplo la Organización Mundial de Meteorología (WMO, por sus siglas en inglés, 1986) para simulaciones de caudal y pronósticos en tiempo real.

6.2 Consideraciones Generales

El modelo SRM incluye las variables de precipitación, cobertura nival y temperatura, todos a nivel diario; además, se debe contar con la información del caudal (también a nivel diario) para realizar el proceso de calibración y validación.

El modelo se confeccionó a base de 5 bandas, las cuales abarcan distintas áreas, siendo la inferior más extensa y disminuyendo hacia bandas superiores. Esto busca modelar de mejor manera la entrega de caudal del manto nival, el cual presenta distintas características físicas a distintas alturas. La nieve se acumula en mayor cantidad en zonas altas donde precipita más y, por otra parte, la menor temperatura en zonas altas posibilita que el manto nival persista por más tiempo, el cual evoluciona hacia una densidad mayor y por tanto, a igual cobertura se produce más escorrentía.

El fuerte gradiente altitudinal que existe en Los Andes dificulta considerar un modelo agregado, ya que esto significaría establecer las mismas condiciones para toda el área de estudio, hecho que no entrega una modelación razonable debido a la evolución del manto nival.

Para considerar el flujo base de la cuenca, se considera una banda adicional (banda #1) al cual se le asigna el valor del área completa de cuenca, se le asigna una precipitación diaria constante y no considera cobertura nival. Parte del trabajo de calibración corresponde a la definición de la precipitación diaria que genere el flujo base de la cuenca.

La calibración se realizó considerando toda la información hidrológica disponible de la cuenca, de manera de determinar si es posible ajustar un set de parámetros que explique de buena forma la variabilidad que presentan los caudales en el periodo en estudio.

Para el ingreso de las variables, se consideró una precipitación distinta para cada banda dependiendo del gradiente de precipitaciones obtenido mediante los registros mensuales de las estaciones pluviométricas disponibles. La temperatura se extrapoló a cada banda considerando el parámetro ΔT (gradiente de temperatura), el cual se trabajó como un parámetro a calibrar. La cobertura de nieve se extrajo de imágenes satelitales, según lo indicado en el Capítulo 4.

Considerando la curva hipsométrica se definieron las bandas, en las cuales se definen los parámetros y variables.

Tabla 6.1 Bandas del modelo Embalse Melado

Banda	Área de zona	Altura hipsométrica media
(#)	(Km ²)	(msnm)
1	2237	600
2	800	1420
3	700	1982
4	500	2326
5	150	2577
6	87	2861

Fuente: Elaboración Propia

6.3 Proceso de Calibración/Validación del Modelo

La versión computacional empleada solo permite modelar un año a la vez, por lo tanto cada calibración y validación se llevó a cabo en corridas por años separados. Dado que se dispone de información de cobertura nival a partir del año 2000, el proceso de calibración y validación sólo contiene dicho periodo para el análisis.

6.3.1 Calibración del Modelo

Para calibrar el modelo se emplearon del orden de 1/3 de la serie de datos, los cuales corresponden a los siguientes años 2005/06, 2006/07, 2009/10, 2011/12 y 2015/16, de manera de representar años de distinto comportamiento hidrológico.

Los parámetros se calibraron a nivel mensual, se consideraron comunes para todas las bandas a excepción del factor grado día, con lo cual se busca una mejor modelación de la evolución del manto nival. Los parámetros a calibrar corresponden a:

ΔT	Gradiente de temperatura, ($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$).
T crit	Temperatura crítica de precipitación lluvia o nieve, ($^{\circ}\text{C}$).
Lag time	Tiempo de retraso entre el ciclo diario de temperatura y el ciclo de caudal resultante (hr).
CS	Coeficiente de escorrentía para la nieve, (-)
CR	Coeficiente de escorrentía para la lluvia, (-)
RCA	Aporte de la lluvia sobre el manto de nieve, se tienen 2 valores 0 o 1 ([0] la lluvia es retenida por el manto de nieve / [1] la lluvia aporta al caudal de deshielo de toda el área de la banda).
X	Coeficiente de recesión del parámetro K (ver subcapítulo 2.3.3), (-).
Y	Coeficiente de recesión del parámetro K (ver subcapítulo 2.3.3), (-).
An	Factor grado día, ($\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$).

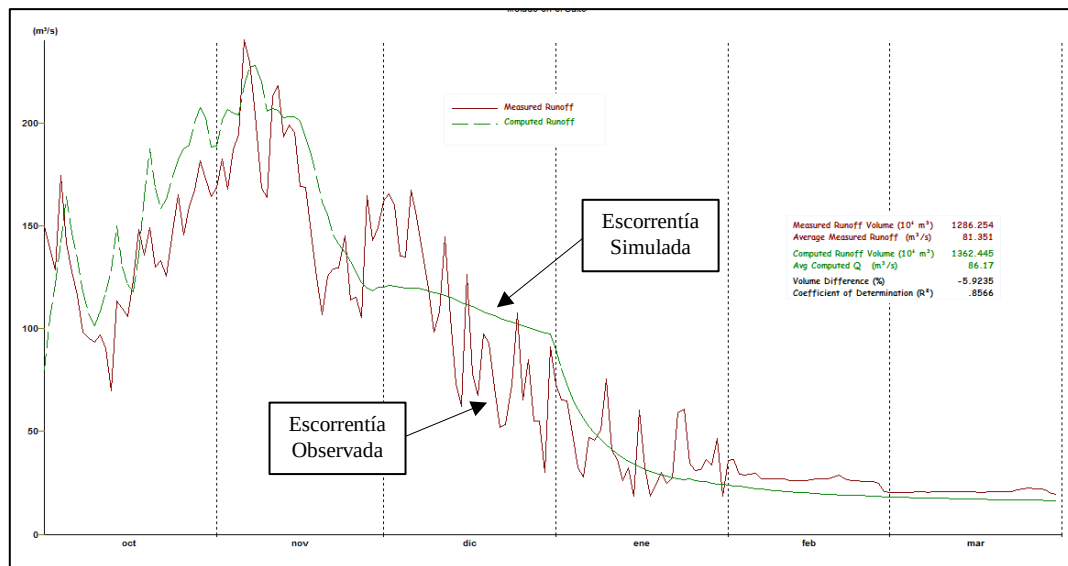
Para el caso de las precipitaciones, se emplearon los datos de la estación Hornito y se ajustaron a bandas de elevación de altura construyendo un gradiente con la estación Armerillo. Por otro lado, para el caso de las temperaturas, se ingresaron los valores máximos y mínimos diarios de

la estación Colorado y mediante la calibración del modelo se ajustó el gradiente de temperatura para el ajuste de las bandas definidas.

Cabe hacer notar que la simulación desarrollada se realiza a nivel diario, en base a lo cual se construyen los valores mensuales y de la temporada, que se emplean como base entre los datos observados y simulados.

La calibración del modelo se inicia con los valores indicados en el documento “The Snowmelt-Runoff Model SRM User Manual”. A partir de los valores indicados en ese documento, se realizó en ajuste para obtener el gráfico de Escorrentía Observada v/s Simulada de caudal diario. A continuación se presenta una imagen de ejemplo.

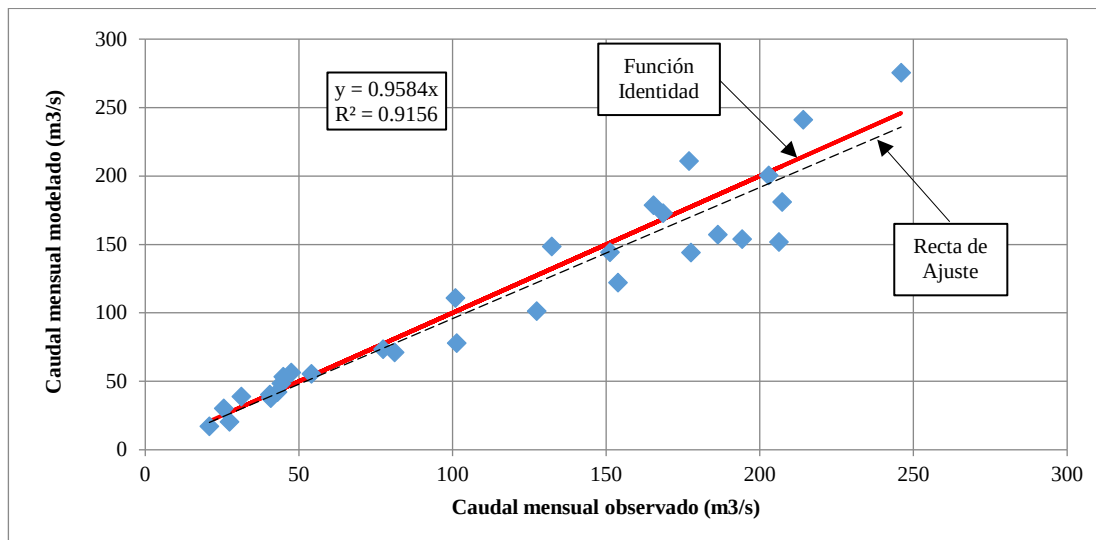
Figura 6.1 Resultados de calibración modelo SRM periodo 2015-16
Escorrentía Observada v/s Simulada



Fuente: Resultado modelo SRM

En la Figura 6.2 se presenta el ajuste entre los caudales observados y modelados para los meses de calibración considerando para el Embalse Melado. Como parámetro de comparación para la mejor compresión del gráfico, se ha agregado la función identidad y la recta de ajuste entre datos; en general los datos calibrados a nivel mensual reproducen los valores observados, con un promedio en torno al 4% por debajo de los valores observados.

Figura 6.2 Caudales medios mensuales observados y modelados, etapa de calibración



Fuente: Elaboración Propia

Los parámetros de calibración considerando se muestran en la Tabla 6.2 y Tabla 6.3.

Tabla 6.2 Parámetros para bandas en Embalse Melado

	ΔT	T crit	Lag time	CS	CR	RCA	X	Y
Octubre	0.45	1	18	0.8-0.9 $\updownarrow^{30}$	0.10	0-1	1.20	0.08
Noviembre	0.45	1	18	0.9	0.10	1	1.20	0.06
Diciembre	0.40	1	18	0.9	0.10	1	1.30	0.06
Enero	0.35	1	18	0.9	0.10	1	1.21	0.07
Febrero	0.35	1	18	0.9	0.10	1	1.21	0.07
Marzo	0.35	1	18	0.9	0.10	1	1.21	0.07

$\updownarrow^{30}$: Variación lineal en el mes (30 días) entre valor mínimo y máximo

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.3 Factor grado día de bandas para Embalse Melado (un set de parámetros)

Mes	An				
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Octubre	0.10	0.20	0.20	0.50	0.50
Noviembre	0.10	0.40	0.50	0.50	0.50
Diciembre	0.10	0.40	0.60	0.65	0.65
Enero	0.10	0.40	0.60	0.65	0.65
Febrero	0.10	0.40	0.60	0.65	0.65
Marzo	0.10	0.40	0.60	0.65	0.65

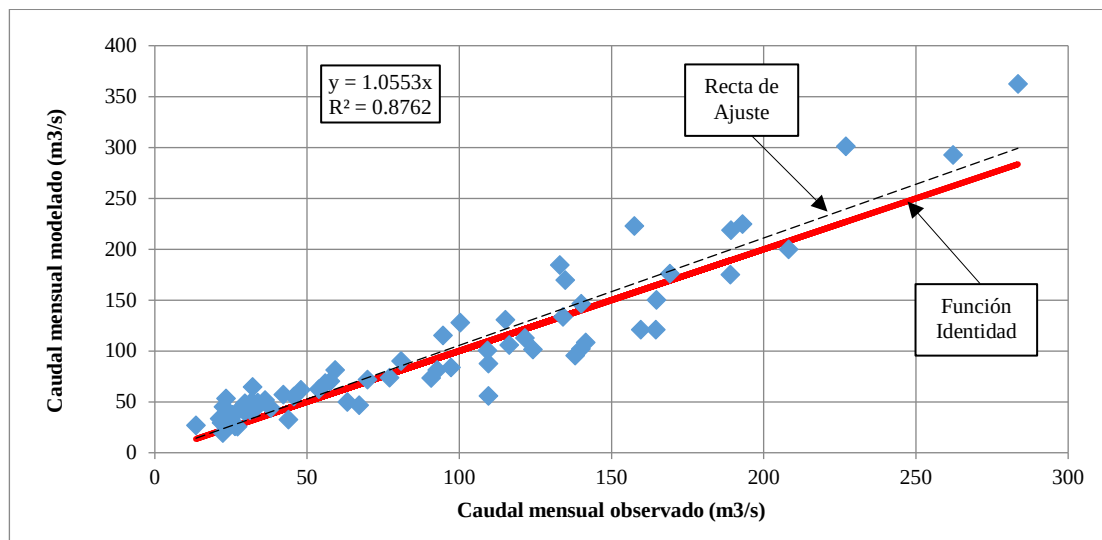
Fuente: Elaboración Propia

6.3.2 Validación del Modelo

Para la validación del modelo se emplearon del orden de 2/3 de la serie de datos, los cuales corresponden a los años 2000/01, 2001/02, 2002/03, 2003/04, 2004/05, 2007/08, 2008/09, 2010/11, 2012/13, 2013/14, 2014/15.

En base de los resultados de calibración del modelo, se emplean los mismos parámetros determinados en las Tabla 6.2 y 5.3, con lo cual se obtienen los caudales simulados que se presentan en la siguiente figura

Figura 6.3 Caudales medios mensuales observados y modelados, etapa de validación



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 6.3 se presenta el ajuste entre los caudales observados y modelados para los meses de validación. De igual manera que en el proceso de calibración, los datos a nivel mensual reproducen los valores observados, pero en este caso con un promedio en torno al 5% por sobre los valores observados; se aprecia que las mayores dispersiones se producen en la parte alta de los datos.

6.4 Análisis de los Resultados

El modelo SRM entrega resultados a nivel diario, pero a nivel mensual o de la temporada de deshielo se obtienen mejores resultados, debido a que el promedio de caudales a nivel diario compensa los errores dentro del mismo mes entre el caudal modelado y observado. Por ejemplo, en el año 2015-2016 (ver Anexo 3) se obtiene un coeficiente R^2 medio a nivel diario (0.86), comparado a otros años, pero al promediar los datos a nivel mensual se obtiene un alto coeficiente R^2 (0.99), lo que evidencia que los valores modelados no necesariamente reproducen exactamente el valor real observado para un día en particular, pero que en promedio, logran determinar el caudal mensual.

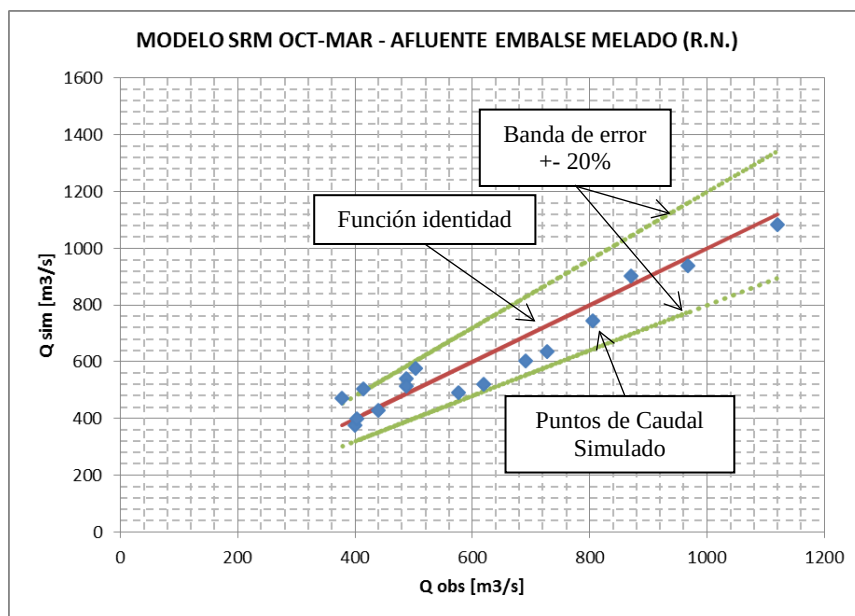
Realizando el análisis global del periodo en estudio (2000-2015), este modelo permite estimar de buena medida el caudal para la temporada de deshielo (oct.-mar), el cual se resume en la siguiente tabla y se observa en la Figura 6.4:

Tabla 6.4 Resultados de caudal de deshielo octubre-marzo

AÑO	Q obs.	Q sim.	R^2 diario	R^2 mensual
	oct-mar	oct-mar		
2000/01	870	903	0.68	0.93
2001/02	691	605	0.57	0.84
2002/03	1119	1082	0.57	0.92
2003/04	378	473	0.40	0.86
2004/05	488	542	0.78	0.96
2005/06	968	938	0.76	0.95
2006/07	805	744	0.81	0.91
2007/08	414	505	0.62	0.77
2008/09	504	577	0.74	0.90
2009/10	727	637	0.74	0.98
2010/11	399	375	0.66	0.94
2011/12	620	522	0.78	0.99
2012/13	403	399	0.71	0.80
2013/14	440	428	0.79	0.94
2014/15	577	493	0.70	0.92
2015/16	488	516	0.86	0.99

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.4 Modelo SRM Q simulado vs Q observado.



Fuente: Elaboración propia

La evaluación del modelo SRM se realiza a través de la evaluación de los índices de bondad indicados en el Capítulo 4, los cuales son altos y representan un buen ajuste del modelo para determinar el caudal de deshielo de la temporada. A continuación se presenta los resultados:

Tabla 6.5 Resultados de índice de bondad evaluados del modelo SRM

Modelo	R ²	e _y	N.S.	N.S.LN	% Acierto con error <5%	% Acierto con error <10%	% Acierto con error <20%	% Acierto con error <50%
SRM	0.92	74	0.91	0.87	31%	50%	88%	100%

Fuente: Elaboración propia

En Anexo C se presenta el detalle de la calibración y resultados del modelo.

6.5 Recomendaciones para Aplicación del Modelo SRM

Principalmente se puede realizar un mejoramiento en la confección del modelo SRM tomando en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Realizar una calibración del modelo diferenciando parámetros para años secos-normales y años húmedos.
- Desde el punto de vista de pronósticos, un inconveniente en la aplicación de este modelo corresponde a que a comienzos de temporada de deshielo no se conoce la curva de ablación de la nieve ni el comportamiento de las temperaturas.
- En lo que respecta a la cubierta nival, ésta se puede subsanar efectuando un análisis de tendencias medio, considerando el comportamiento de años similares de acuerdo con las características hidrológicas del año y la evolución de la curva de acumulación de nieve durante el periodo de otoño-invierno.
- En relación a la temperatura, según el análisis de tendencias desarrollado, en general se observa que no existe una variación significativa, de manera tal que se considera factible emplear un promedio en base al registro histórico.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL ANÁLISIS

7.1 Consideraciones Generales

Conocer la disponibilidad de los recursos hídricos de una cuenca permite planificar la producción eléctrica y la disponibilidad de caudal de riego, lo cual se hace cada vez más necesario debido por un lado al uso intensivo de los recursos y por otro a la nueva disponibilidad prevista dado las tendencias de cambio climático. Por lo anterior, en este trabajo se realizaron modelos de simulación de caudales según las condiciones hidrometeorológicas particulares de la cuenca durante la temporada de deshielo. Para ello se seleccionó la cuenca Afluente al Embalse Melado, ubicada en la región del Maule, la cual presenta un comportamiento nivo-pluvial con una superficie aproximada de 1000 [km²] sobre la cota 2000 [msnm].

Dentro de los análisis realizados a la información disponible, tanto de caudales como de precipitaciones, se observa una clara disminución de ellos durante los últimos 30 años, lo cual se intensifica a partir del año 2005, lo cual podría estar atribuido a la influencia de un cambio climático global. Por lo anterior, y por la información disponible de cobertura nival, se realiza la confección, calibración y validación de los modelos con la información disponible a partir del año 2000 en adelante.

Los modelos a desarrollar corresponden a los siguientes tipos:

- **Modelos estadísticos**, basado en regresiones multilíneal con componentes autoregresivas, los cuales permiten definir el volumen total de esorrentía de la temporada de deshielo.
- **Modelo del tipo fusión de nieve**, el modelo propuesto corresponde a “Snowmelt Runoff Model” (SRM) el cual corresponde a una herramienta computacional destinada a la modelación y simulación del caudal medio diario en cuencas montañosas.

Para los cuales se muestran los resultados y conclusiones a continuación.

7.2 Conclusiones del Análisis de Modelos Estadísticos

Para la confección de los modelos se consideran las siguientes variables predictoras:

- Precipitación octubre-marzo ($P_{p_{oct-mar}}$)
- Precipitación abril-septiembre ($P_{p_{abr-sept}}$).
- Equivalente en agua de la temporada (EA)
- Caudal mensual observado de 1, 2 o 3 meses anteriores (Q_{n-1} , Q_{n-2} y Q_{n-3})
- Caudal máximo del periodo octubre-marzo (Q_{max})
- Índice de Cobertura Nival

Con la combinación de dichas variables se confeccionan 21 modelos diferentes para estimación de caudales de deshielo, considerando la información disponible desde el año 2000 a 2015, los cuales se evalúan a través de índices de bondad de ajuste que se usan como indicadores para determinar los mejores modelos de simulación y se presentan a continuación.

Tabla 7.1 Resultados del Modelo Afluyente Río Melado

Modelo			Resultados del Modelo								
Tipo	ID	Variables	R ²	e _y	N.S.	N.S./N	% Acierto con error <5%	% Acierto con error <10%	% Acierto con error <20%	% Acierto con error <50%	MODELO
Cobertura Nival / Precipitación / Autoregresivo en Caudal	1.0	Pp(abr-sept)	0.64	139	0.64	0.59	13%	44%	75%	94%	VÁLIDO
	2.0	EA	0.86	87	0.86	0.81	19%	56%	81%	100%	VÁLIDO
	3.0	ICN	0.91	69	0.91	0.85	38%	69%	88%	100%	VÁLIDO
	4.0	EA-Pp(oct-mar)	0.90	80	0.90	0.86	25%	69%	88%	100%	VÁLIDO
	5.0	ICN-Pp(oct-mar)	0.93	63	0.93	0.91	38%	69%	94%	100%	VÁLIDO
	6.0	EA-Pp(oct-mar)-Q(n-1)	0.92	70	0.92	0.90	44%	81%	88%	100%	VÁLIDO
	7.0	ICN-Pp(oct-mar)-Q(n-1)	0.95	57	0.95	0.94	44%	75%	100%	100%	VÁLIDO
	8.0	EA-Pp(oct-mar)-Q(n-1)-Q(n-2)	0.92	73	0.92	0.90	38%	81%	88%	100%	VÁLIDO
	9.0	ICN-Pp(oct-mar)-Q(n-1)-Q(n-2)	0.95	60	0.95	0.94	44%	75%	100%	100%	VÁLIDO
	10.0	EA-Q(n-1)	0.89	79	0.89	0.85	25%	50%	94%	100%	VÁLIDO
	11.0	ICN-Q(n-1)	0.93	64	0.93	0.88	25%	69%	81%	100%	VÁLIDO
	12.0	EA-Q(n-1)-Q(n-2)	0.90	82	0.89	0.86	19%	44%	94%	100%	VÁLIDO
	13.0	ICN-Q(n-1)-Q(n-2)	0.93	67	0.93	0.88	25%	69%	81%	100%	VÁLIDO
	14.0	Pp(oct-mar)-Q(n-1)	0.55	163	0.56	0.54	13%	38%	69%	94%	VÁLIDO
	15.0	Pp(abr-sept)-Q(n-1)	0.72	129	0.72	0.65	6%	31%	81%	100%	VÁLIDO
	16.0	Pp(oct-mar)-Q(n-1)-Q(n-2)	0.71	137	0.72	0.66	6%	13%	69%	100%	VÁLIDO
	17.0	Pp(abr-sept)-Q(n-1)-Q(n-2)	0.76	123	0.77	0.72	13%	25%	75%	100%	VÁLIDO
	Autoregresivo en Caudal	18.0	Q(n-1)	0.54	159	0.55	0.56	13%	31%	69%	94%
19.0		Q(n-1)-Q(n-2)	0.70	134	0.71	0.69	19%	19%	69%	100%	VÁLIDO
20.0		Q(n-1)-Q(n-2)-Q(n-3)	0.73	131	0.73	0.71	6%	25%	69%	100%	VÁLIDO
21.0		O max	0.86	88	0.86	0.82	6%	50%	88%	100%	VÁLIDO

Fuente: Elaboración propia

En general, los mejores modelos incluyen las variables de Índice de Cobertura Nival (ICN) o Equivalen en Agua (EA), Precipitación oct-mar ($P_{p_{oct-mar}}$) y Caudal mensual observado de 1 y/o 2 meses anteriores (Q_{n-1} y Q_{n-2}). Destacan los modelos 7 (Variables: ICN - $P_{p_{oct-mar}}$ - Q_{n-1}) y 9 (Variables: ICN - $P_{p_{oct-mar}}$ - Q_{n-1} - Q_{n-2}), los cuales presentan mejores índices en todos los

parámetros evaluados, destacando principalmente el modelo 7, el cual tiene un 100% de acierto con error menor a 20% y un error estándar menor en comparación con el modelo 9.

La dificultad que presentan los modelos anteriores corresponde a la determinación de la variable de precipitación octubre-marzo. Para realizar la simulación del caudal de deshielo de la temporada, esta variable debe ser estimada, lo cual puede realizarse en base a la predicción estacional realizada por la Dirección Meteorológica de Chile, a través del Boletín de Tendencia Climáticas disponible en la página de internet <http://www.meteochile.gob.cl>. Para evitar esto, el modelo 11 (Variables: ICN - $Q_{(n-1)}$), parece ser un modelo con un mejor pronóstico de caudales de deshielo.

Finalmente, los modelos con la variable Índice de Cobertura Nival (ICN) presentan mejores porcentajes de acierto en comparación con los modelos equivalentes con la variable de Equivalente en Agua (EA), con lo cual se puede inferir que esta variable (ICN) permite realizar un mejor ajuste en los resultados del modelo.

7.3 Conclusiones del Análisis del Modelo SRM

El modelo SRM incluye las variables de precipitación, cobertura nival y temperatura, todos a nivel diario; además, se debe contar con la información del caudal (también a nivel diario) para realizar el proceso de calibración y validación. La confección del modelo se realiza en base a 5 bandas de distintas superficie, y adicionalmente se incluye una banda extra para la calibración del flujo base.

El proceso de calibración del modelo incluye 1/3 de los datos disponibles, empleando años de distinto comportamiento hidrológico. Los parámetros se calibraron a nivel mensual y se consideraron comunes para todas las bandas a excepción del factor grado día, con lo cual se busca una mejor modelación de la evolución del manto nival. Para la validación del modelo se emplearon del orden de 2/3 de la serie de datos.

Los resultados que entrega el modelo SRM corresponden a valores diarios, los cuales presentan un nivel de ajuste razonable con respecto a la media; no obstante muestra dispersiones mayores al analizar en los extremos. Se agrega esta información a nivel de caudales mensuales o de la

temporada, los índices de bondad de ajuste mejoran considerablemente, debido a que el promedio de caudales a nivel diario compensa los errores dentro del mismo mes o de la misma temporada entre el caudal modelado y observado.

En términos generales, este modelo permite estimar de buena medida el caudal para la temporada de deshielo (oct.-mar), el cual se resume en la siguiente tabla.

Tabla 7.2 Resultados de caudal de deshielo octubre-marzo

AÑO	Q obs.	Q sim.	R ² diario	R ² mensual
	oct-mar	oct-mar		
2000/01	870	903	0.68	0.93
2001/02	691	605	0.57	0.84
2002/03	1119	1082	0.57	0.92
2003/04	378	473	0.40	0.86
2004/05	488	542	0.78	0.96
2005/06	968	938	0.76	0.95
2006/07	805	744	0.81	0.91
2007/08	414	505	0.62	0.77
2008/09	504	577	0.74	0.90
2009/10	727	637	0.74	0.98
2010/11	399	375	0.66	0.94
2011/12	620	522	0.78	0.99
2012/13	403	399	0.71	0.80
2013/14	440	428	0.79	0.94
2014/15	577	493	0.70	0.92
2015/16	488	516	0.86	0.99

Fuente: Elaboración propia

El análisis de calidad de los resultados obtenidos con el modelo SRM se realiza a través de la evaluación de los índices de bondad señalados en el Capítulo 4, los cuales son altos y representan un buen ajuste para determinar el caudal de deshielo de la temporada. A continuación se presenta los resultados:

Tabla 7.3 Resultados de índice de bondad evaluados del modelo SRM

Modelo	R ²	e _y	N.S.	N.S.LN	% Acierto con error <5%	% Acierto con error <10%	% Acierto con error <20%	% Acierto con error <50%
SRM	0.92	74	0.91	0.87	31%	50%	88%	100%

Fuente: Elaboración propia

7.4 Conclusiones y Recomendaciones Finales

Los modelos desarrollados permiten obtener resultados aceptables para el pronóstico de caudales de deshielo, lo cual se evalúa a través de los altos índices de bondad de ajuste ya mencionados.

Como método de evaluación, se observa que para fines prácticos el coeficiente de determinación y el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe presentan los mismos resultados, lo cual se complementa con el índice de Nash-Sutcliffe asociado al logaritmo de los caudales que permite evaluar el funcionamiento del modelo enfocado en los caudales menores. Adicionalmente, la evaluación del error estándar permite realizar el análisis comparativo entre modelos que presentan valores R^2 , N.S. y N.S.LN similares.

En general ambos modelos presentan distinto nivel de dificultad en su aplicación, principalmente debido a la disponibilidad de información de las variables utilizadas. La gran dificultad del modelo SRM radica en la disponibilidad de información diaria para las variables de entrada lo cual no necesaria está disponible en todas las estaciones hidrometeorológicas del país.

En relación a la aplicación de los diversos tipos de modelos, el SRM presenta la ventaja de que además de pronosticar la disponibilidad estacional del recurso, permite definir la distribución mensual y con un menor nivel de precisión, la disponibilidad diaria.

En particular, en la medida que se disponga de información satelital actualizada, el modelo SRM permite realizar el seguimiento del deshielo con pronósticos de corto plazo a nivel de caudales diarios y/o semanales, lo cual se considera de utilidad en relación a la planificación inmediata de recursos y/o la operación temprana de obras tales como embalses.

Por otro lado los modelos de tipo estadísticos, en general han sido calibrados para definir volúmenes de la temporada y como tal, no permiten establecer la distribución estacional. Una forma de subsanar este inconveniente, es a través de la distribución adimensional asociada a años de comportamiento similar.

Además, estos modelos presentan un segundo inconveniente, que en general, a diferencia del modelo SRM, entregan un margen escaso para mejorar la calidad de pronósticos al disponer de información actualizada del comportamiento del deshielo en la medida que avanza la temporada. Lo anterior se puede subsanar calibrando nuevas expresiones de cálculo que permiten pronosticar el volumen remanente.

Como recomendación para mejorar ambos modelos, se puede realizar una diferenciación de variables y parámetros para años secos-normales y años húmedos, lo cual permitiría comparar años con un comportamiento hidrológico similar.

Para el pronóstico de caudales del modelo SRM es necesario estimar la cubierta nival a nivel diario, para la cual se puede considerar el comportamiento de años similares según las características hidrológicas del año y la evolución de la curva de acumulación de nieve durante el periodo de otoño-invierno. En relación a la temperatura, según el análisis de tendencias desarrollado, en general se observa que no existe una variación significativa, de manera tal que se considera factible emplear un promedio en base al registro histórico.

BIBLIOGRAFÍA

CHOW, Ven. Te., MAIDMENT David R. y MAYS Larry. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill. 2000. 572 p.

SPIEGEL, Murray. Probabilidad y Estadística. McGraw-Hill. 1998. 372 p.

ESPILDORA, Basilio. BROWN, Ernesto. Elementos de Hidrología. Centro de Recursos Hidráulicos Departamento de Obras Civiles, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. 1975. 461 p.

MARTINEC, Jaroslav. RANGO, Albert y ROBERT, Ralph. The Snowmelt-Runoff Model SRM User Manual. Updated Edition 2007 Windows Version 1.11.

GÓMEZ, Luis. Utilización del modelo SRM para pronosticar caudales de deshielo en cuencas andinas de la zona central del país. Tesis (Ingeniero Civil). Santiago. Universidad Andrés Bello. Facultad de Ingeniería y Construcción Civil, Escuela de Ingeniería Civil, 2002.

MOLNAR, P. "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland, 2011.

CARTES, Mauricio. Pronóstico de volúmenes de deshielos mediante redes neuronales recurrentes e imágenes satelitales MODIS. Tesis (Ingeniero Civil). Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil, 2009.