**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

# ESTACIÓN NIVOMÉTRICA DE MONTAÑANA: MEDICIONES EN ÉPOCA INVERNAL Y APLICACIÓN A UN BALANCE DE ENERGÍA

**SEBASTIÁN FERNÁNDEZ M.[1]**
**JAMES MCPHEE T.[2]**

## RESUMEN

Con el fin de lograr un mejor entendimiento de los procesos hidrológicos en cuencas de montaña en los Andes Centrales, se ha instalado una estación con instrumental nivométrico automatizado. A través de los sensores instalados, se pueden obtener observaciones de la densidad de nieve y SWE en tiempo real. Se presentan mediciones durante la época invernal, junto con relaciones con variables meteorológicas. Adicionalmente, se realiza una un balance de energía puntual, mediante el modelo SNOBAL, asociado al modelo hidrológico CRHM, por medio del cual se identifican los principales flujos que intervienen en el derretimiento. Posteriormente se extiende el balance a nivel de cuenca realizando una discretización por medio de unidades de respuesta hidrológica. Los resultados indican que eventos de derretimiento en invierno pueden explicar mejor la variabilidad observada en escorrentía.

[1] Ingeniero Civil (e), Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Dirección General de Aguas, Región del Biobío – sefernan@ing.uchile.cl
[2] Profesor Asociado, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile– jmcphee@ing.uchile.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Contar con observaciones en terreno permite reducir la incertidumbre en los modelos predictivos. Ante la menor información con que se cuenta en las zonas de mayor elevación de las cuencas de la Zona Central del país, se ha instalado una estación meteorológica con monitoreo nivométrico a 3.000 m.s.n.m en la cuenca Mapocho en Los Almendros. Las mediciones que entrega la estación, han dado pie a desarrollar un modelo de derretimiento basado en un balance de energía puntual y distribuido.

## 2. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA

La cuenca hidrográfica del Río Mapocho en Los Almendros (MeLA) se encuentra en la zona cordillerana de la Región Metropolitana, hacia el nororiente de la ciudad de Santiago. Junto con el Estero Arrayán, conforma la subcuenca alta del Río Mapocho, constituyendo así una cuenca afluente al Río Maipo.

Desde el punto de vista del estudio, la cuenca reúne características relevantes como: (1) situación geográfica de montaña; (2) reducida intervención en el régimen hidrológico (no existen grandes embalses de control); (3) medianamente instrumentada con estaciones fluviométricas y meterológicas (DGA y Universidad de Chile); (4) rutas de acceso que permiten llegar a las estaciones para descargar datos actualizados; y (5) reducida área urbanizada, conservando en su mayor parte las condiciones naturales de la zona. Estas características permiten que la cuenca seleccionada sea apta para el estudio de los procesos hidrológicos como acumulación y derretimiento de nieve, derivando en la posterior escorrentía.

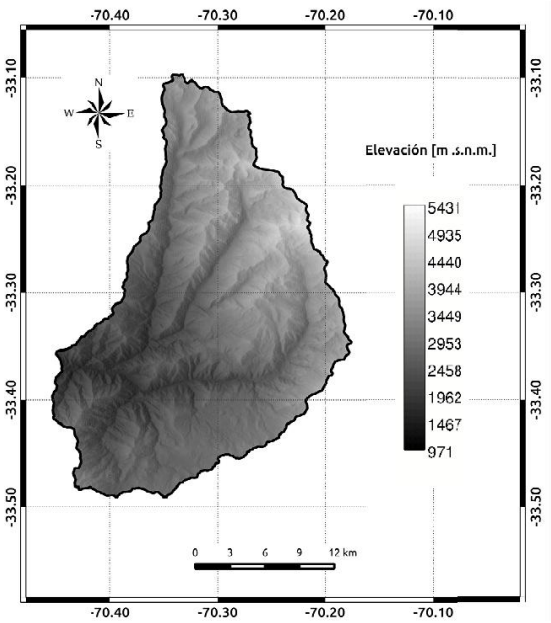


**Figura 1**. Mapa de elevaciones de la cuenca.

La cuenca se sitúa entre los paralelos 33°07' y 33°29' Sur y los meridianos 70°10' y 70°27' Oeste, abarcando una superficie de 632,85 $Km^2$ dentro de un perímetro de 128,5 Km. De acuerdo al modelo global de elevación digital (GDEM) de ASTER, el punto más bajo de la cuenca se encuentra a 971 m.s.n.m., mientras que la cumbre más alta alcanza los 5431 m.s.n.m., perteneciente al Cerro El Plomo (Figura 1).

La curva hipsométrica de la Figura 2 muestra que el 99,99 % de la superficie de la cuenca se sitúa sobre los 1000 m.s.n.m., otorgándole características propias de cuenca de montaña. Además se observa que el 7,76 % de área toral se encuentra sobre los 4000 m.s.n.m. La elevación media de la cuenca alcanza los 2781 m.s.n.m., mientras que la pendiente media es de 25,1°.

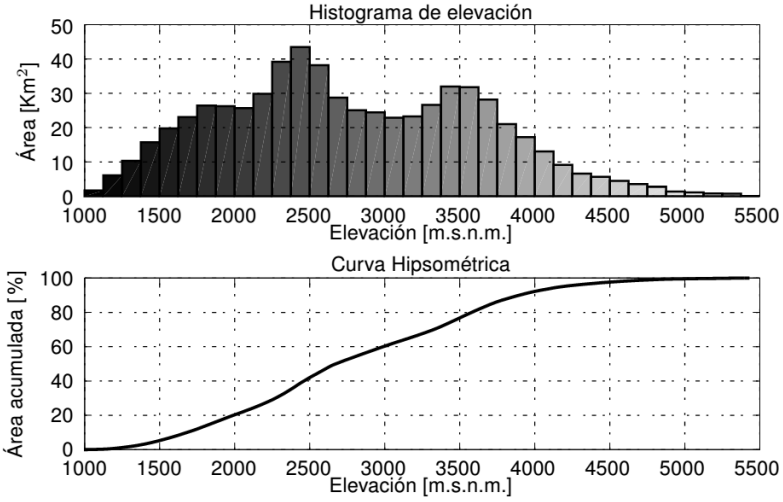


**Figura 2**. Histograma de elevaciones y curva hipsométrica.

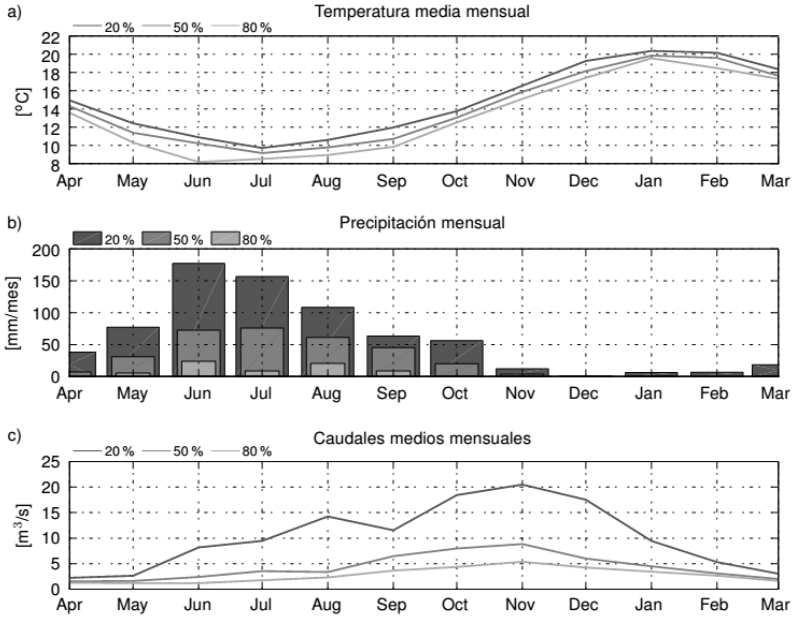


**Figura 3**. Variaciones estacionales de: a) temperatura, b) precipitación y c) caudal en Mapocho en Los Almendros.

## 3. OBSERVACIONES METEROLÓGICAS Y NIVOMÉTRICAS

La estación UChile – Valle Nevado (UCh-VN) se trata de una central meteorológica instalada por el Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Se ubica en los 33o21'5.91" Sur y 70o14'48.58" Oeste al interior del centro de ski Valle Nevado. Situada a 3036 m.s.n.m., cuenta con instrumentos especialmente diseñados para el monitoreo de la nieve en forma automatizada. La Tabla 1 presenta los sensores instalados en la estación de Valle Nevado.

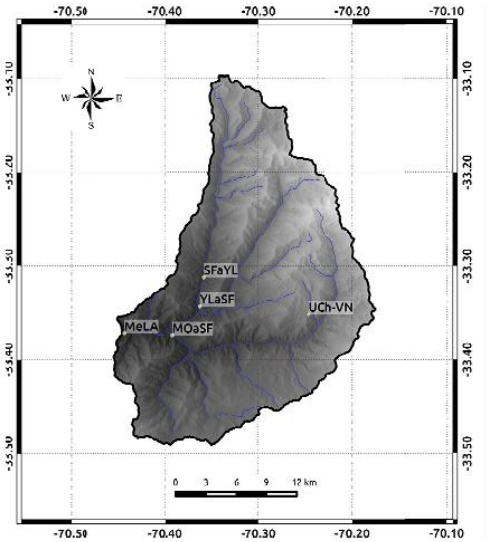


**Figura 4**. Ubicación estaciones de monitoreo limnimétrico y meteorológico

**Tabla 1**. Sensores instalados en estación UChile – Valle Nevado

| Sensor | Variable observada | Rango | Resolución | Precisión |
|---|---|---|---|---|
| Sonda Campbell HMP60 | Temperatura del aire<br>Humedad Relativa | -40 a 60 [°C]<br>0 a 100 [ %] | 0.001 [°C]<br>0.01 [ %] | 0.6 [°C]<br>3 a 7 [ %] |
| Anemómetro Young 05103-5 | Velocidad del viento<br>Dirección del viento | 0 a 100 [m/s]<br>0 a 360 [°] | 0.001 [m/s]<br>0.001 [°] | 0.3 [m/s]<br>3 [°] |
| Barómetro Campbell CS10 | Presión atmosférica | 500 a 1100 [mb] | 0.1 [mb] | 0.3 a 1.5 [mb] |
| Piranómetro LiCor Li200 | Onda corta incidente | 0 a 3000 [W/m$^2$] | 1 [W/m$^2$] | 3 a 5 [ %] |
| Piranómetro LiCor Li200 | Onda corta reflejada | 0 a 3000 [W/m$^2$] | 1 [W/m$^2$] | 3 a 5 [ %] |
| Radiómetro Kipp and Zonen CNR2 | Onda corta neta<br>Onda larga neta | 0 a 1000 [W/m$^2$]<br>-250 a 250 [W/m$^2$] | 0.1 [W/m$^2$]<br>0.1 [W/m$^2$] | 2 [ %]<br>1 [ %] |
| Pluviómetro OTT Pluvio2 200 | Precipitación sólida y líquida | 0 a 1500 [mm] | 0.01 [mm] | 0.1 [mm] ó 5 [ %] |
| Sommer Snow Scale | SWE del manto | 0 a 2000 [mm] | 0.1 [mm] | 0.3 [ %] |
| Sommer SPA | Fracción volumétrica de hielo y agua en el manto | 0 a 99.9 [ %] | 0.1 [ %] | - |
| Sommer USH-8 | Profundidad del manto | 0 a 8 [m] | 1 [mm] | 0.1 [ %] |

Las observaciones del manto nival se realizaron por medio de dos sistemas de medición:

**SnowScale**

Consiste en un dispositivo que mide el agua equivalente de la nieve, especialmente diseñado para su instalación en terreno. Se compone por placas de aluminio instaladas en un marco metálico sobre la superficie del suelo. Su principio de funcionamiento se basa en celdas de carga instaladas por debajo de una placa central sobre la cual la nieve se va acumulando.

**Snow Pack Analyser (SPA)**

La nieve consta de tres componentes: hielo, agua y aire. Empleando distintas frecuencias, estos componentes muestran diferentes constantes dieléctricas. El Snow Pack Analyser mide la impedancia compleja en dos frecuencias a lo largo de una cinta plana inserta en la nieve, pudiendo así estimar el contenido volumétrico de hielo y agua. Con esta información y a través de la ecuación 2.4, este dispositivo calcula la densidad de la nieve en forma continua y automatizada. Junto al SPA, se puede incorporar un sensor ultrasónico para medir la profundidad del manto, que combinado con la densidad, define el agua equivalente en nieve.

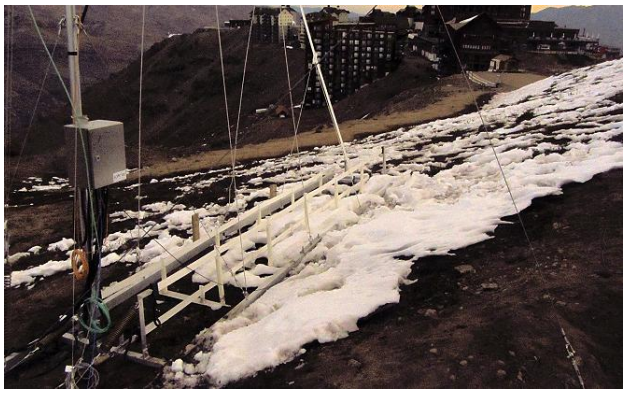

**Figura 5.** Instalación Snow Pack Analyser en estación UChile-Valle Nevado. Mayo 2013

En la Figuras 6 y 7 se presentarán las mediciones llevadas a cabo por la estación meteorológica automática en Valle Nevado, situada a unos 3036 [m.s.n.m.]. El periodo con datos nivométricos abarca desde las 00:00 del 7 de agosto hasta las 00:00 del 27 de septiembre de 2013, con mediciones a intervalos de 15 minutos.

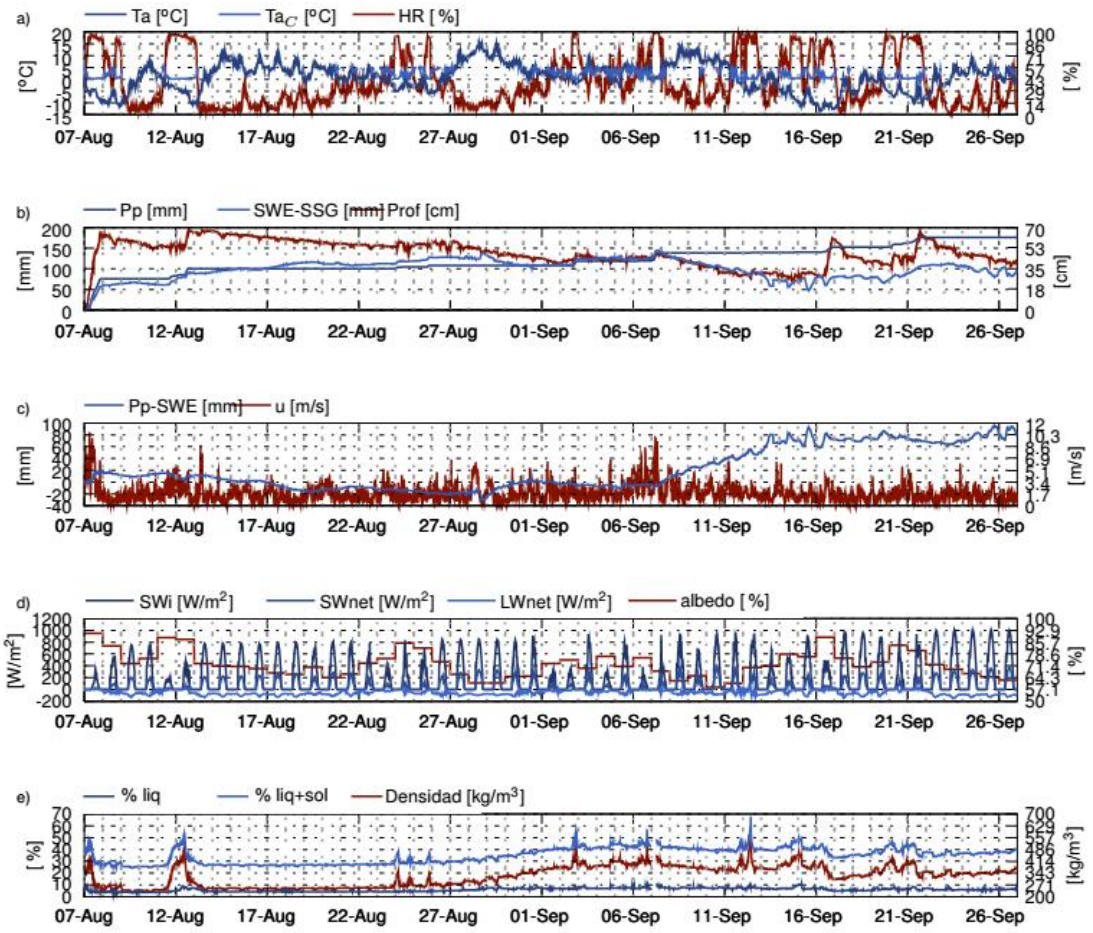


**Figura 6**. Datos Estación UCh-VN.

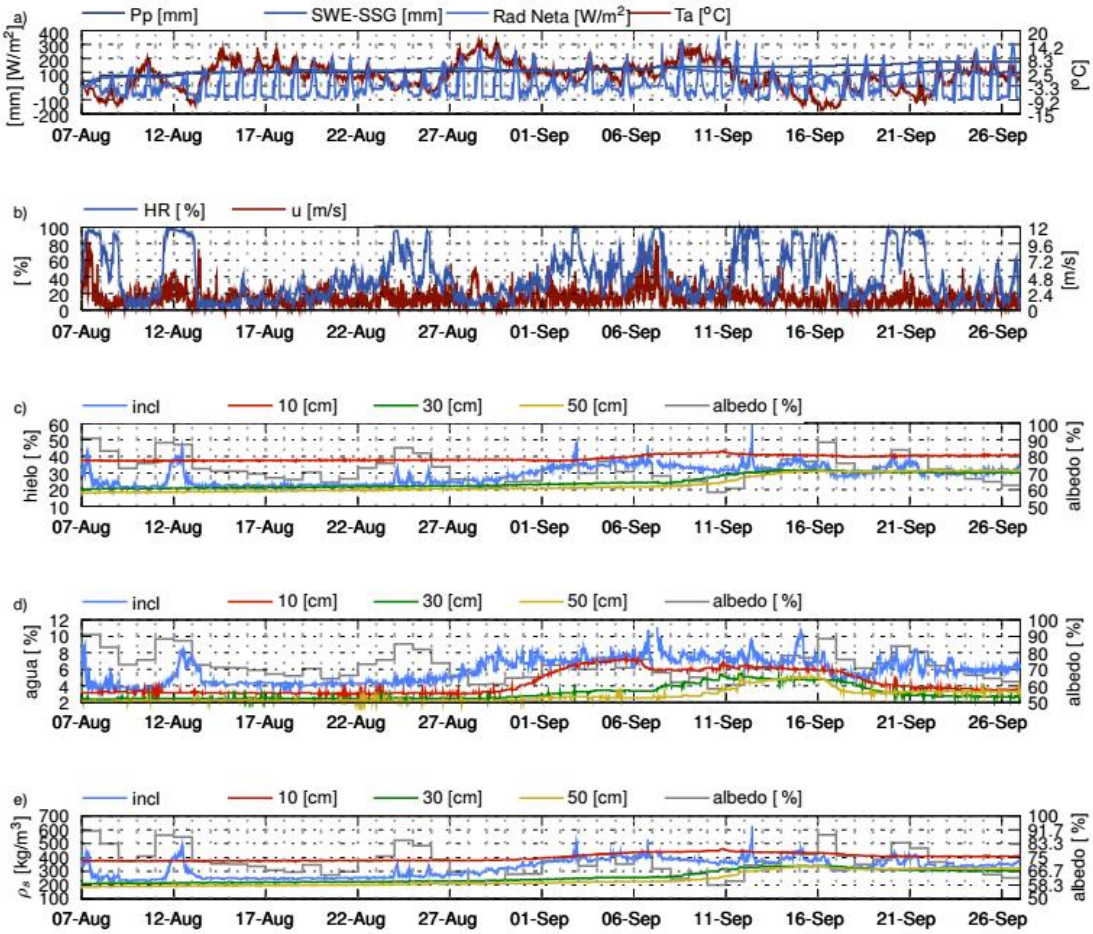


**Figura 7**. Datos nivométricos estación UCh-VN.

## 4. BLANCE DE ENERGÍA PUNTUAL Y DISTRIBUIDO

Empleando las mediciones de la estación UChile – Valle Nevado se ha elaborado un balance de energía puntual en CRHM. El procedimiento se ha basado en la utilziación del modelo SnobalCRHM, el cual simula el derretimiento de nieve a través de un balance de energía puntual. El manto nival es representado en dos capas: una inferior y una capa activa superficial de espesor constante. La fusión es calculada una vez que la energía acumulada excede el contenido de frío o el contenido de frío es positivo.

Con este procedimiento se busca representar el intercambio de energía entre el manto nival, la atmósfera y el suelo, con el fin de simular el SWE observado en la estación UChile – Valle Nevado (Figura 8).

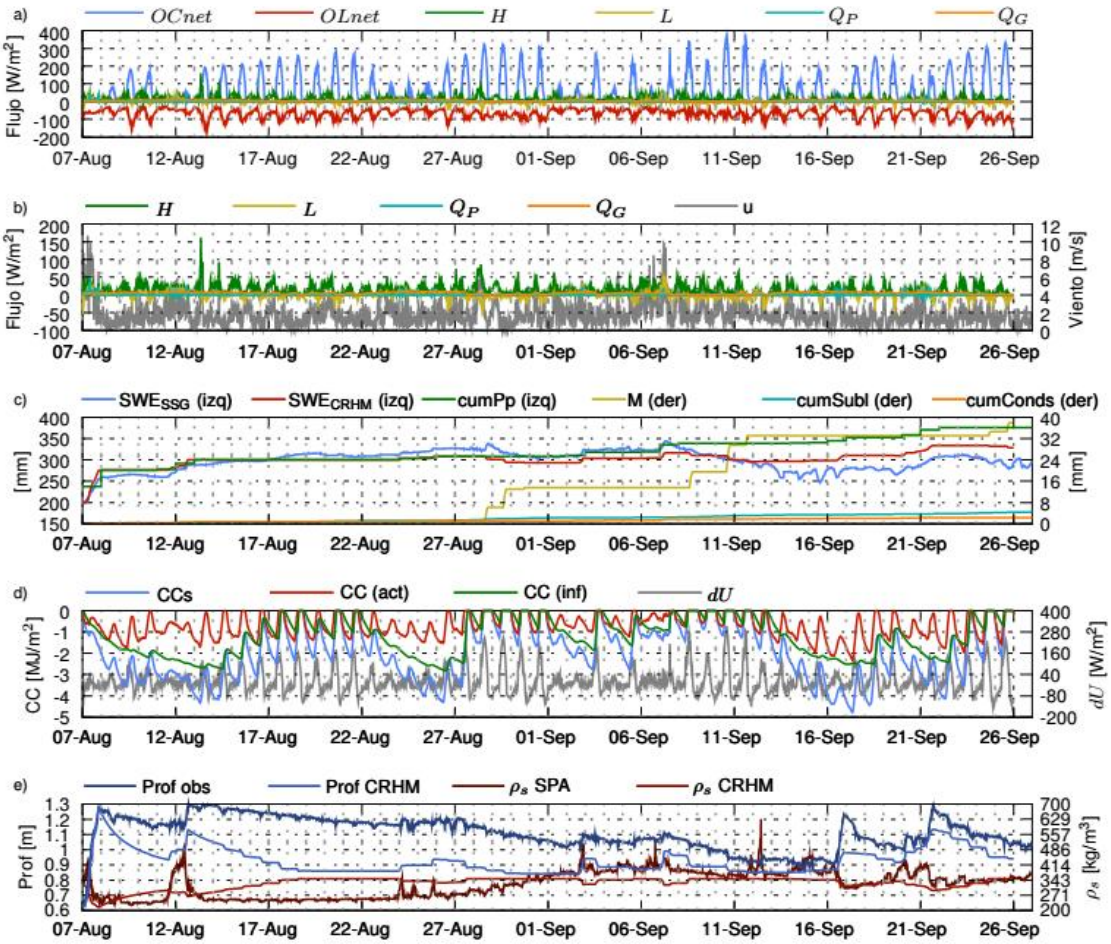


**Figura 8**. Balance de energía en estación UChile – Valle Nevado

La discretización espacial de la cuenca se realizado mediante unidades de respuesta hidrológica (URH), las cuales constituyen subdivisiones espaciales con características físicas y biológicas propias. Por ello, se han considerado los siguientes criterios para delimitar URH:

- **Hidrgráfico**: Se ha divido la zona de acuerdo a las subcuencas.
- **Elevación**: Dentro de cada subcuenca, se han seleccionado tres bandas de elevación: baja, media y alta; abarcando cada una un tercio del área de la subcuenca a la que pertenece.
- **Pendiente**: Debido a las características topográficas de la zona, se han seleccionado URH de acuerdo a tres tipos de pendientes según el rango: baja, media y alta.
- **Aspecto**: Adicionalmente se ha categorizado por aspecto, tomando en cuenta que la radiación solar y el efecto del viento varían de acuerdo a la orientación respecto al norte que presenta una determinada superficie. Se establecen cuatro grupos: Norte, Este, Sur y Oeste.

Basado en el trabajo de Cortés (2010), se ha elaborado la Figura 9, donde el perfil logarítmico logra ser una buena representación de la variación de la precipitación con la altura, resultando un valor de $R^2$ igual a 0.99.

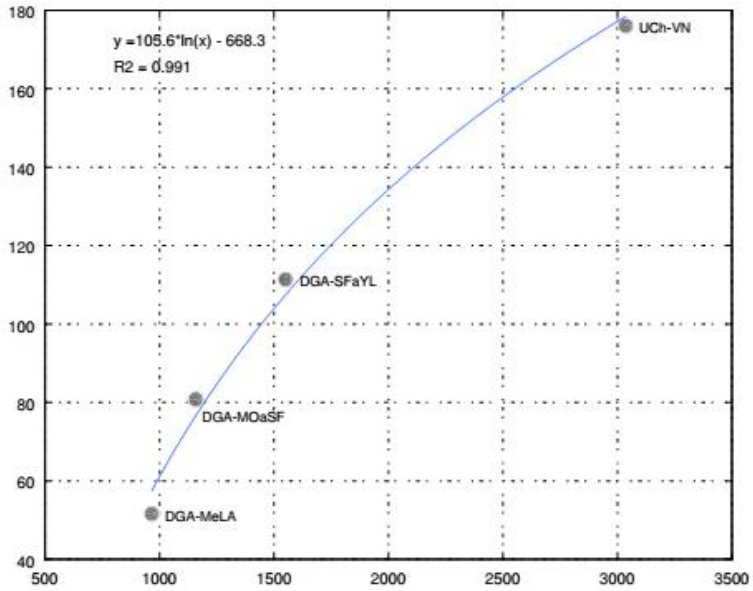


**Figura 8**. Precipitación en la temporada registrada según elevación.

De esta forma, la precipitación a una elevación z en un tiempo determinado t, queda expresada por la ecuación 1.

$$Pp(z,t) = \frac{A\ln(z) + B}{A\ln(z_{VN}) + B} Pp_{VN}(t) \tag{1}$$

donde:
$z$ = elevación $z$ [m.s.n.m.]
$z_{VN}$ = elevación estación UChile – Valle Nevado = 3036 [m.s.n.m.]
$Pp(z, t)$ = Precipitación en la elevación $z$ en el tiempo $t$ [mm]
$Pp_{VN}(t)$ = Precipitación en la estación UChile – Valle Nevado en el tiempo $t$ [mm]
$A$ = 105,6
$B$ = -668,3

Debido a la variabilidad espacial que puede presentar la radiación solar, su distribución es un proceso más complejo. Por este motivo, se ha empleado el programa GRASS capaz de analizar un modelo de elevación digital mediante el comando r.sun, el cual calcula la radiación directa, difusa en un mapa ráster para una fecha, latitud y condiciones atmosféricas dadas.

El resultado de este modelo no incorpora el efecto de la nubosidad, por tal motivo, para determinar la radiación en cada una de las celdas del mapa ráster, se empleará la ecuación 2

que distribuye la radiación solar incidente observada en la estación UChile – Valle Nevado basado en los resultados de r.sun.

$$OC \downarrow (x,t) = \frac{OC \downarrow_{r.sun} (x, d_t)}{OC \downarrow_{r.sun} (x_{VN}, d_t)} OC \downarrow_{VN} (t) \tag{2}$$

donde:
$OC \downarrow (x, t)$ = Radiación solar incidente en la celda x en el tiempo $t$ [W/m$^2$]
$OC \downarrow_{r.sun} (x, dt)$ = Radiación solar incidente calculada por r.sun en la celda x en el día $dt$ correspondiente al tiempo $t$ [W/m$^2$]
$OC \downarrow_{r.sun} (x\ VN, dt)$ = Radiación solar incidente calculada por r.sun en la celda donde se encuentra la estación UChile – Valle Nevado para el día $d$ correspondiente al tiempo $t$ [W/m$^2$]
$OC \downarrow_{VN} (t)$ = Radiación solar incidente observada en la estación UChile – Valle Nevado en el tiempo $t$ [W/m$^2$]

En la Figura 9 se presenta la simulación del SWE en forma distribuida en la cuenca. En los ejes de las ordenadas de cada panel se indican las 36 URH para una de las subcuencas de la zona en estudio (Río Molina antes de San Francisco, MOaSF). Las variables que se presentan son: a) SWE modelado en [mm], b) tasa de derretimiento modelado en [mm/int], donde int representa el intervalo temporal correspondiente a 15 [min], derretimiento simulado acumulado en [mm] y la escorrentía superficial proveniente desde el suelo, una vez que la capacidad de infiltración ha sido satisfecha [mm].

Por su parte, la Figrua 10 muestra en el panel a) las siguientes variables: precipitación neta (net p), precipitación líquida neta [net rain] y precipitación sólida neta [net snow], entendiéndose como valor neto a la cantidad de agua que alcanza el suelo una vez descontados los procesos de infiltración. El panel b) presenta los caudales observados en la salida de una subcuenca (MOaSF, en rojo), a la salida de la cuenca (MeLA, en azul) y el caudal simulado para la subcuenca MOaSF. El panel c) contiene el SWE modelado (SWE CRHM), el derretimiento simulado acumulado, la infiltración acumulada, la escorrentía superficial desde el suelo saturado y humedad de suelo; todas estas variables corresponden a una URH ubicada en la parte baja de la cuenca. A modo de guía, en el b) se pueden observar las mediciones de temperatura para cuatro estaciones al interior de la cuenca: U. de Chile – Valle Nevado (UCh-VN), DGA Mapocho en Los Almendros (DGA-MeLA), DGA San Francisco antes de Yerba Loca (DGA-SFaYL), DGA Yerba Loca en Piedra Carvajal (DGA-YLePC).

Si se observan las curvas del panel b) de la Figura 9, éstas exhiben una variabilidad intradiaria, que a partir de los resultados de la modelación, son atribuibles a los periodos derretimiento diarios que se que muestra el panel b) de la Figura 8 (ver flechas).

**Figura 9**. Precipitación en la temporada registrada según elevación

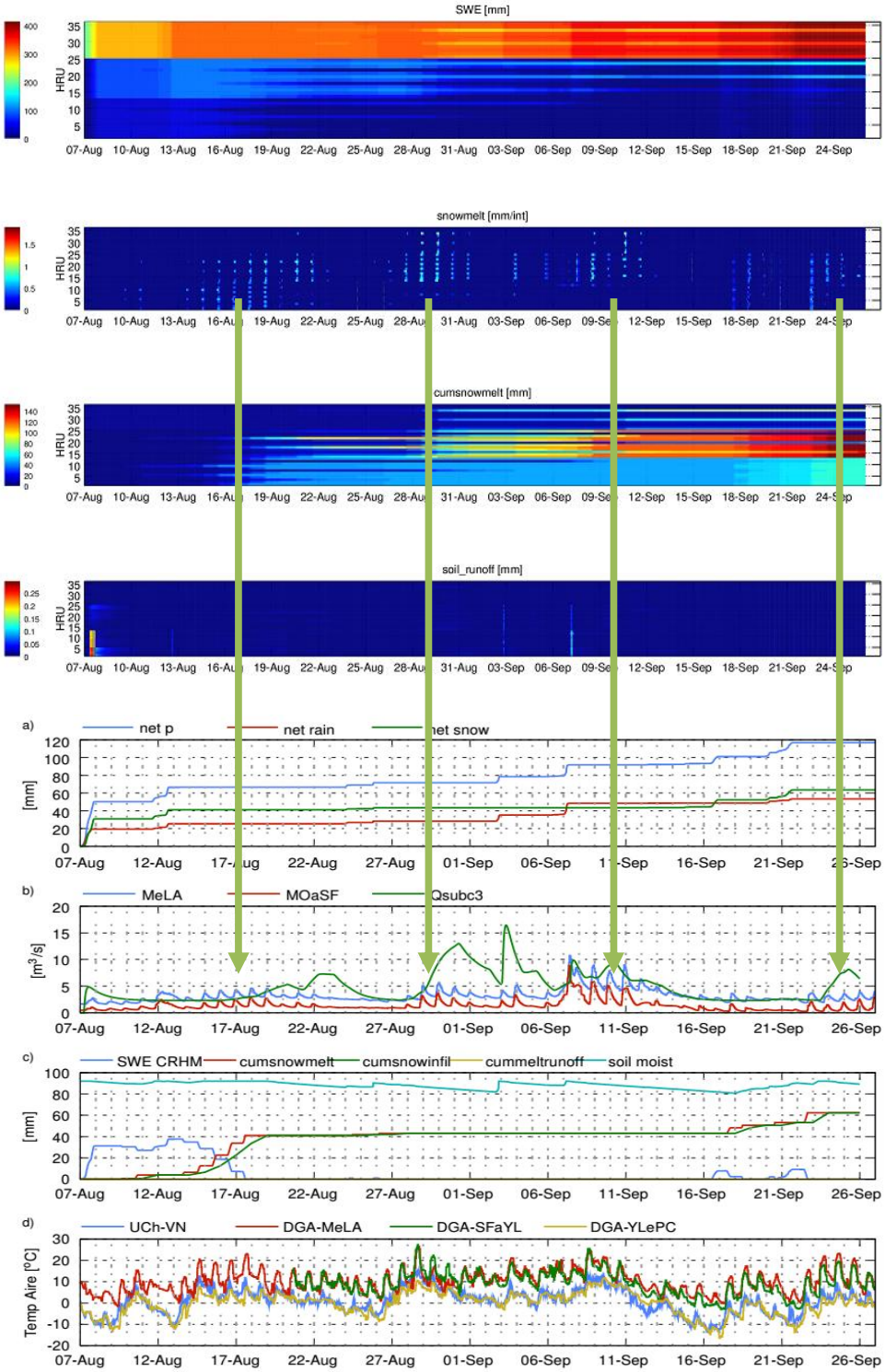


**Figura 10**. Simulación de caudales y caudales observados (panel b).

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el empleo de instrumentación diseñada para realizar observaciones del manto nival de manera *in situ*, automatizada e instantánea. Ello ha permitido contar con información rara vez vista, como es la densidad del manto en forma continua a lo largo de una temporada.

La información disponible ha permitido evaluar el funcionamiento del equipo nivométrico, detectando posibles errores instrumentales y aportando observaciones a un gran nivel de detalle para estudiar el comportamiento del manto con mayores antecedentes.

El balance de energía que dispone CRHM tiene fundamentación física sólida, lo cual permite adaptar el modelo a diversos escenarios. La mayor parte de los parámetros representan condiciones físicas del manto, por lo cual no requiere la necesidad de procesos de calibración para la optimización de parámetros.

Gracias a lo anterior, los resultados del balance de energía muestran una buena correlación con el agua equivalente observada por el Snow Scale en la estación UChile – Valle Nevado, reflejada en un coeficiente N-S de 0,24. Se distinguen ciertos periodos en que el modelo subestima el derretimiento, por ejemplo a partir del 12 de septiembre. Una explicación de este fenómeno se puede relacionar con que CRHM asume la capa activa de una profundidad constante en el tiempo, lo que lo conlleva que el contenido de frío pueda ser más negativo, retrasando el derretimiento.

Mediante el modelo, se han podido simular las tasas de derretimiento en forma puntual y distribuida. Como resultado se ha podido identificar que la variabilidad intradiaria observada en el b) de la Figura 10, es atribuible a periodos de derretimiento pre-primaverales, más que eventos de precipitación líquida.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica CONICYT, a través del Proyecto Fondecyt 1121184, así como la colaboración brindada por el equipo de trabajo del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

## REFERENCIAS

Bravo, C. y Garreaud, R. 2011. El régimen nival en cuencas andinas de Chile Central. Segundo Congreso de Oceanografía Física, Meteorología y Clima del Pacifico Sudoriental.

CADE-IDEPE y Dirección General de Aguas (DGA). 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Maipo.

Cortés, G. 2010. Evaluación de un modelo hidrológico semi distribuido para la estimación de la escorrentía de deshielo en el Río Juncal. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.

DeWalle, D. R., y Rango, A. 2008. Principles of snow hydrology. Cambridge University Press.

Dingman, S. L. 2015. Physical hydrology. Waveland press.

Essery, R., Li, L., y Pomeroy, J. (1999). A distributed model of blowing snow over complex terrain. Hydrological processes, 13(1415), 2423-2438.

Gray, D. M., & Landine, P. G. 1988. An energy-budget snowmelt model for the Canadian Prairies. Canadian Journal of Earth Sciences, 25(8), 1292-1303.

Kind, R. J. 1981. Snow drifting. Handbook of snow: principles, processes, management and use, 338-359.

King, D. L., & Myers, D. R. 1997, Septiembre. Silicon-Photodiode pyranometers: operational characteristics, historical experiences, and new calibration procedures. In Photovoltaic Specialists Conference, 1997., Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE (pp. 1285-1288). IEEE.

Pomeroy, J. W., Gray, D. M., Brown, T., Hedstrom, N. R., Quinton, W. L., Granger, R. J., y Carey, S. K. 2007. The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence. Hydrological Processes, 21(19), 2650-2667.

Sommer, W. y Fiel R. 2009. Snow Pack Analyser (SPA) for snow water equivalent (SWE) and liquid water content.