

Modelación distribuida de la cobertura nival para el pronóstico de volúmenes de deshielo

PATRICIO VALCK C., XIMENA VARGAS M. & MAURICIO CARTES

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Casilla 228/3, Santiago, Chile

pvalck@ing.uchile.cl

Resumen Para la modelación de la cobertura del manto nival y su evolución temporal en el período de acumulación, se plantea un modelo que discretiza la zona en estudio en una grilla regular de 200 m, para resolver en cada elemento las ecuaciones de balance de energía y masa. Las variables meteorológicas de entrada al modelo, son obtenidas de los pronósticos a 24 horas de un modelo meteorológico de meso escala a las que, artificialmente, se aumenta su resolución espacial. La aplicación del modelo a la cuenca alta del río Maipo, Chile, permite validar el procedimiento a través de imágenes satelitales y caudales de deshielo medidos en distintos puntos de control dentro de la cuenca, observándose en promedio errores de estimación del orden del 24% en la cobertura nival y volumen acumulado al final de la temporada de acumulación inferior en 11% con respecto al volumen registrado en el período de deshielo en las subcuencas evaluadas, lo que muestra la potencialidad del modelo de simulación para fines de pronóstico en cuencas pequeñas sin control fluviométrico.

Palabras clave modelación distribuida; nieve; imágenes satelitales; balance de energía; pronóstico meteorológico

Estimating snowmelt volume using snow cover distribution modelling

Abstract The snow cover and its temporal evolution in a region are simulated by solving the energy and mass balance equations on each element of a regular grid of 200 m. The meteorological variables required as inputs for the simulation model are obtained from the 24-hour lead time forecasts of a mesoscale meteorological model, known as MM5/DGF, and artificially increasing its spatial resolution. The procedure is validated for the mountainous Maipo River watershed, Chile. The results obtained are compared with satellite images and snowmelt volumes observed at some gauges in the region. A standard error of 24% is obtained for the snow cover and an error of only 11% is obtained for the total period snowmelt volume, which indicates the potential use of the model for forecasting this variable in ungauged basins.

Key words distributed modelling; snow; satellite images; energy balance; meteorological forecasts

INTRODUCCIÓN

Conocer la cobertura, espesor y calidad del manto nival es de suma importancia para la determinación de la disponibilidad de agua superficial en la temporada de deshielo para riego, hidroelectricidad y otras actividades productivas, especialmente en zonas en que ésta es su principal fuente en los períodos secos.

Los modelos utilizados en la actualidad en Chile para efectuar estos pronósticos son, en general, modelos estadísticos que utilizan como variable registros fluviométricos, precipitación invernal medida en una o más estaciones y/o equivalentes en agua registrados en las escasas rutas de nieve disponibles en el país. Estos modelos, extrapolan una situación puntual hacia todo el manto de nieve estudiado, lo que imposibilita la simulación de subcuencas, y son incapaces de realizar una simulación continua del comportamiento del manto nival siendo válidos sólo en grandes cuencas.

Conocer la evolución del manto de nieve con mayor detalle posibilita hacer pronósticos más acertados de la disponibilidad de agua para temporadas secas. Además, si se obtiene una representación espacial, se pueden implementar políticas de gestión del agua que mejoren el uso de ésta.

En este trabajo, se muestra un modelo espacialmente distribuido para la simulación continua de la evolución del manto de nieve, el que simula el estado del manto aplicando ecuaciones de balance de energía y masa a una representación en grilla regular de la zona de modelación. El modelo utiliza como datos de entrada pronósticos meteorológicos (precipitación, viento, etc.) distribuidos espacialmente que provienen de un modelo meteorológico de meso escala.

En esta oportunidad se expondrán resultados obtenidos en la cuenca alta del río Maipo, Chile, y en dos de sus subcuencas para el período de acumulación del año 2002, los cuales se validan mediante imágenes satelitales y mediciones en terreno.

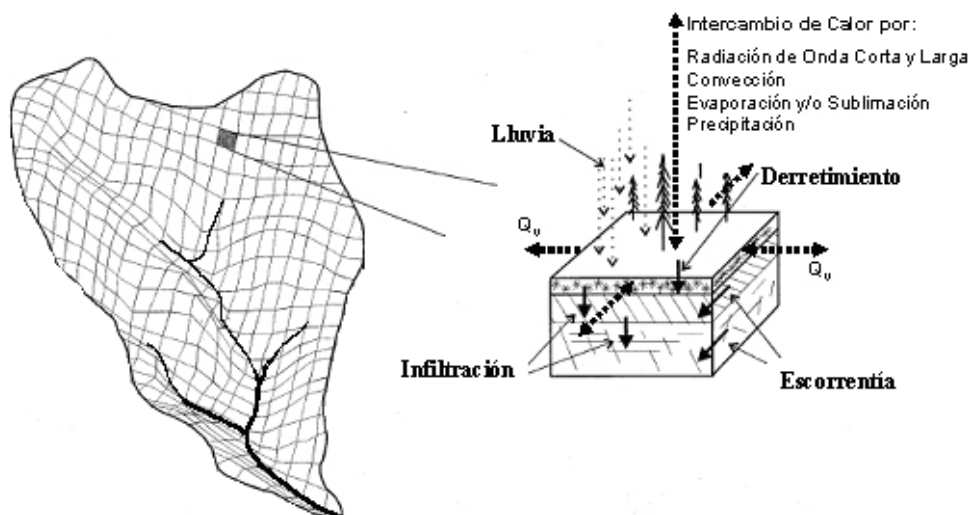


Fig. 1 Esquema de modelación nival general en grilla regular.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo desarrollado simula el estado del manto discretizando la zona a simular en una grilla regular, tal como se muestra en la Fig. 1, aplicando a cada elemento ecuaciones de balance de energía y masa. La información meteorológica utilizada es la generada por el modelo de pronóstico de meso escala MM5/DGF, operado por el Departamento de Geofísica (DGF) de la Universidad de Chile a una resolución espacial de 15 km y temporal de una hora.

La existencia o no de precipitación sólida distingue el comportamiento del manto. Cuando la nieve no recibe precipitación sólida está expuesto a las acciones del medio caracterizado por precipitación líquida o ausencia de ésta. Producto de esto se produce derretimiento, percolación, evaporación, ablación y densificación que pueden ser cuantificados mediante un balance de energía entre el manto y el medio que lo rodea, y en menor medida un balance de masa. Es así como el US Army Corps of Engineers (1998) y otros autores proponen evaluar el efecto de transferencia de calor en la parte más superficial del manto, la que se designa capa activa (CA), a través de una ecuación de balance de energía.

En cambio, cuando el manto es sometido a precipitación sólida, el efecto de transferencia de calor es mucho menor, predominando el balance de masa sobre el energético. Los efectos de una nevada se resumen en un aumento del contenido de frío, profundidad, equivalente en agua y un cambio en la densidad.

La principal fuente de calor o energía (Q) es el Sol, evaluado por la radiación de onda corta (roc) y en una porción menor por la radiación atmosférica o radiación de onda larga (rol). Además, se consideran las transferencias de calor por convección (ss), por condensación (lat), el calor cedido por la lluvia (Q_{pp}), la transferencia de calor entre elementos circundantes (Q_v) y el calor intercambiado con la superficie terrestre (Q_s). En general estas dos últimas componentes son muy poco relevantes en el balance energético, por lo que no afectan mayormente a la metamorfosis del manto. Todas las componentes del balance energético pueden calcularse mediante relaciones termodinámicas que se han descrito en profundidad en la literatura (US Army Corps of Engineers, 1998) y no se detallarán en este trabajo. En síntesis, el balance se expresa como:

$$Q_t = Q_{roc}(1 - Albedo) + Q_{rol} + Q_{ss} + Q_{lat} + Q_s + Q_{pp} + Q_v \quad (1)$$

El modelo MM5/DGF simula la circulación atmosférica a escala regional, mediante leyes no hidrostáticas y ecuaciones de circulación de advección difusión, en un volumen de control de apertura horizontal regular (15 km) y vertical variable. Los resultados de este modelo, son pronósticos meteorológicos a un horizonte máximo de 72 horas (año 2002) y cubren gran parte del territorio Chileno. Se inicializa diariamente a las 0 horas UTC, y genera, cada día, una serie de 72 horas de pronósticos del estado atmosférico para todo su dominio. Utilizando las primeras 24 horas de este pronóstico se puede construir una serie continua de pronósticos meteorológicos de un año,

la que se puede suponer como la secuencia real de variables observadas, las que se utilizan como entrada al modelo de simulación de la cobertura nival planteado. (Otondo *et al.*, 2004). Las variables atmosféricas extraídas del MM5/DGF son: temperatura a 0 y 2 metros sobre la superficie, radiación de onda corta y atmosférica incidente sobre el plano, intercambio de calor sensible y latente con la superficie, precipitación (convectiva y no convectiva) y velocidad del viento.

Lamentablemente, los pronósticos entregados por el modelo meteorológico están a una escala espacial menor a la cuál se requiere hacer la simulación del manto nival, por lo que es necesario aumentar artificialmente la resolución espacial. Para ello se opta por interpolar linealmente en el espacio todas las variables antes citadas.

Para obtener las variables del modelo MM5/DGF representativas de los elementos simulados, se utilizan correcciones de gradientes térmicos típicos de aire seco y húmedo, orientación de los elementos simulados y dirección y magnitud del viento.

ZONA DE APLICACIÓN

La cuenca simulada en este estudio corresponde a la cuenca del río Maipo en El Manzano, cercana a la ciudad de Santiago, capital de Chile (Fig. 2). Las características de la zona de aplicación fueron obtenidas de diversas fuentes, en particular la topografía se obtuvo del programa “Shuttle Radar Topography Mission” a una resolución de 90 m, la que fue suavizada para eliminar anomalías puntuales de la radio – medición topográfica, obteniendo finalmente una grilla de simulación de resolución 200 m, valor adecuado para describir los procesos físicos involucrados (Wigmosta *et al.*, 1994). La región simulada, se traduce en una grilla 720×360 elementos.

La cuenca del río Maipo en El Manzano, es una cuenca marcadamente nival. Su período de acumulación comprende desde mediados de abril, hasta mediados de septiembre. La cuenca nace de las altas cumbres de la Cordillera del Los Andes, del volcán Maipo, y presenta múltiples glaciares entre los que se puede mencionar el Marmolejo, y Olivares. Sus principales ríos son el río Volcán, El Yeso, Colorado y Olivares. En este trabajo se muestran los resultados obtenidos para las subcuencas de las estaciones pluviométricas Maipo en San Alfonso (1), Colorado antes de Junta con Olivares (2) y Maipo en El Manzano (3) (ver Fig. 2).

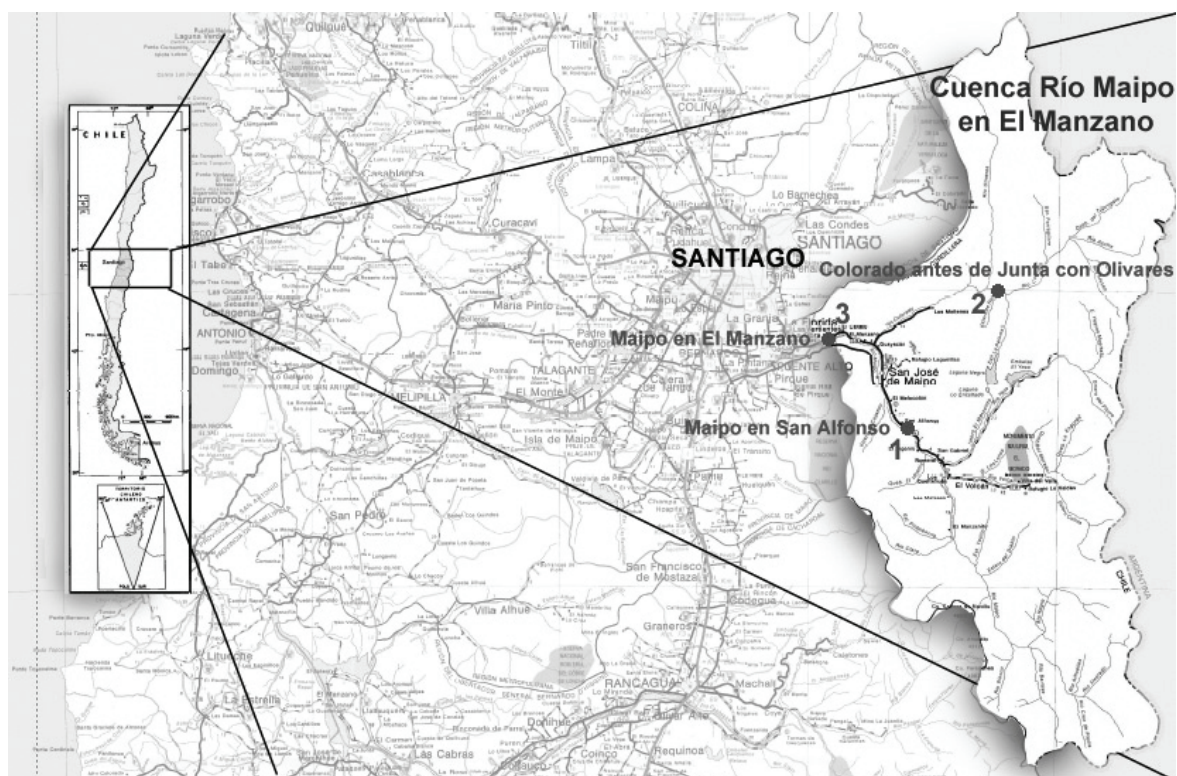


Fig. 2 Ubicación cuenca Maipo en El Manzano.

RESULTADOS

Con los pronósticos realizados por el modelo MM5/DGF para el período abril–septiembre 2002, se simula todo el período de acumulación, desafortunadamente al no contar con pronósticos meteorológicos en el período septiembre – abril no se puede simular el período de derretimiento.

Para analizar los resultados de cobertura se procede a comparar las imágenes de cobertura obtenidas del modelo con imágenes satelitales (NASA/GSFC). Se pueden realizar dos tipos de análisis, comparando el porcentaje de área cubierta por nieve y el acierto o falla del modelo en pronosticar nieve.

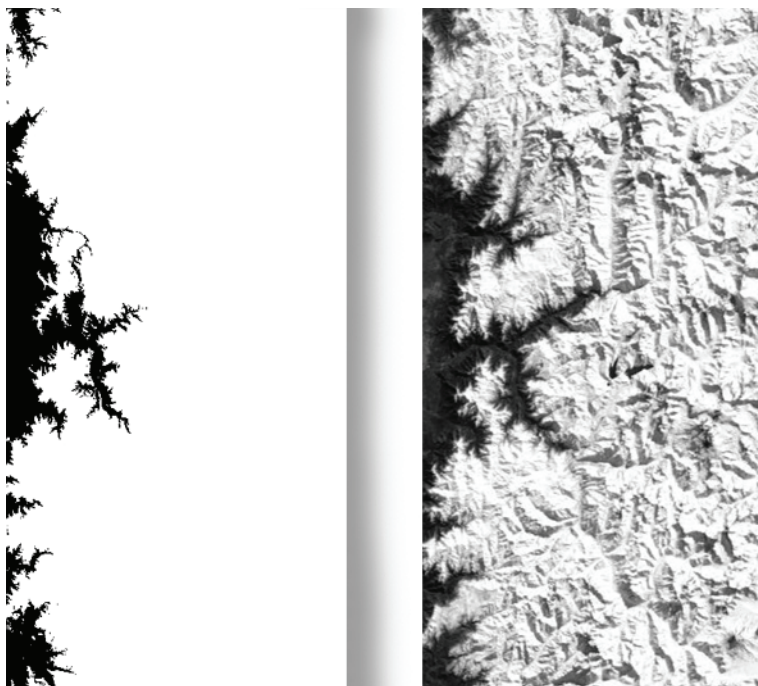


Fig. 3 Cobertura simulada y observada, 18 mayo 2002.

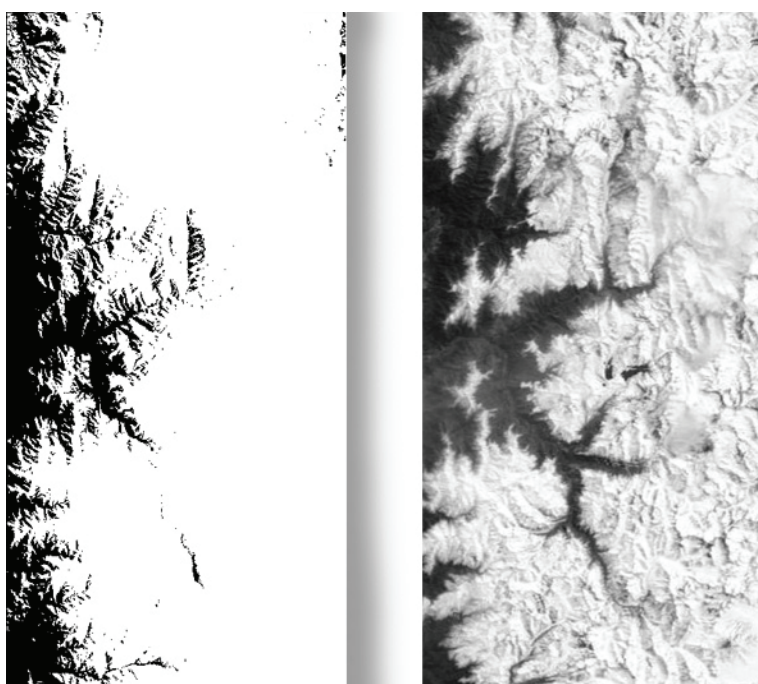


Fig. 4 Cobertura simulada y observada, 20 septiembre 2002.

Tabla 1 Resultados análisis espacial detallado.

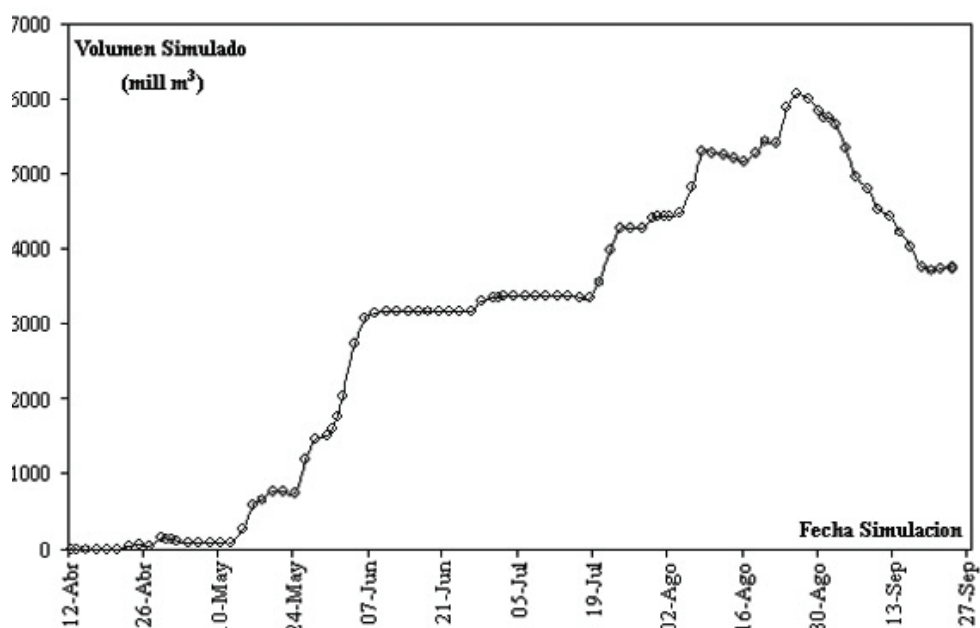
Fecha	Subestima	Sobrestima	Porcentaje Área Nevada Simulada	Porcentaje Área Nevada Observada	Diferencia Porcentaje Área Simulada Observada
18-06-2002	20.4%	1.8%	68.1%	86.7%	18.6%
13-07-2002	38.0%	2.2%	43.3%	79.0%	35.7%
08-08-2002	27.1%	2.0%	53.4%	78.5%	25.2%
20-09-2002	12.1%	5.4%	68.6%	75.3%	6.7%
Promedio	23.6%	2.9%	59.1%	79.9%	20.8%

Tabla 2 Volúmenes de deshielo controlados y pronosticados al término del período de acumulación. Subcuencas analizadas.

Nombre Estación	Área (km ²)	Volumen de Deshielo (10 ⁶ m ³) Observado	Pronosticado	Error porcentual
Maipo en San Alfonso	2850	3505	3735	6.6%
Colorado antes de Olivares	834	764	848	11.0%
Maipo en El Manzano	4769	4301	6370	48.1%

En las Figs 3 y 4 se puede apreciar la cobertura observada (satélite), y la simulada. Al comparar píxel a píxel las coberturas observadas y simuladas, se puede contabilizar los elementos sobrestimados y subestimados, el análisis realizado con cuatro imágenes satelitales de resolución equivalente a la de simulación (Tabla 1).

Para la cuenca de Maipo en San Alfonso, que controla un área de 2850 km², se tiene que el volumen controlado en el período de deshielo 2002/03 alcanza los 3500 mill m³. En la Fig. 5 se muestra la evolución del volumen almacenado en forma de nieve en dicha subcuenca, llegando a fines de septiembre a valores 3700 × 10⁶ m³, bastante cercano al valor total de deshielo controlado en dicha cuenca. De igual forma se tiene que para la subcuenca de Colorado antes de Junta con Olivares (834 km²) se simula un volumen al final del período de acumulación de 847 × 10⁶ m³, contra los 760 × 10⁶ m³ de deshielo controlados en dicha estación. Para Maipo en El Manzano (4769 km²), se simula un volumen al fin de la temporada de acumulación de 6370 × 10⁶ m³, en contraposición con los 4300 × 10⁶ m³ registrados por la estación ahí presente, la que está fuertemente influenciada por los usos del agua que se realizan aguas arriba de ésta. Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 2.

**Fig. 5** Evolución del volumen nival simulado, sub-cuenca Maipo en San Alfonso.

CONCLUSIONES

Se tiene que el modelo en general el subestima la espacialidad del manto en un 23%, a diferencia de resultados obtenidos para la cordillera del Maule, Chile, donde se tiene que sobrestima del orden del 17% (Valck *et al.*, 2004).

En términos de volumen, se considera que el modelo mejora su comportamiento con respecto a aplicaciones anteriores, obteniéndose una sobrestimación del orden del 7%.

Al modelar el manto en forma distribuida, se posibilita obtener resultados a cualquier escala requerida, y en particular en subcuencas no controladas. En este trabajo se validó los resultados obtenidos para dos subcuencas de la región simulada contrastando los valores pronosticados con los realmente controlados por las estaciones pluviométricas presentes observándose una sobrestimación leve del volumen total de deshielo. Este análisis a nivel de subcuencas de la región en estudio superan las expectativas, confirmando la gran flexibilidad de simulación del modelo desarrollado.

Si bien, no se cuenta con datos para validar con mayor exactitud el comportamiento del derretimiento del manto en el período de deshielo, se tiene que en forma global se puede pronosticar con un alto grado de confianza el volumen total a escurrir en la temporada de deshielo con 6 meses de antelación.

REFERENCIAS

- National Aeronautics and Space Administration (NASA), National Imagery and Mapping Agency (NIMA), German Aerospace Center (DLR), Italian Space Agency (ASI) (2002) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) Elevation Dataset. US Geological Survey, Sioux Falls, South Dakota, USA.
- NASA/GSFC MODIS Rapid Response Project <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>.
- Orondo, I, Vargas, X. & Garreaud, R. (2004) Validación de campos de precipitación en Chile Central. In: *XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Sao Pedro, Brasil.
- US Army Corps of Engineers (1998) *Engineering and Design, Runoff from Snowmelt*. US Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA.
- Valck, P. & Vargas, M. (2004) Modelo de simulación de la cobertura del manto nival usando pronósticos meteorológicos de meso escala. Aplicación en la cordillera del Maule, Chile. In: *XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Sao Pedro, Brasil, 2004
- Wigmosta, M., Vail, L. & Lettenmaier, D. (1994) A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Res.* **30**(5), 1665-1679.