

ESTIMACIÓN DE COBERTURA DE NIEVE EN LOS ANDES CENTRALES CON DATOS NOAA-AVHRR. CUENCAS DE LOS RÍOS COLORADO Y NEUQUÉN

Marcelo E. Lascano^{a,b}, Inés Velasco^b

^(a) Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ccs. Ambientales - CONICET.

^(b) Departamento de Cs. de la Atmósfera y los Océanos, Fac. de Cs. Exactas y Naturales, UBA.

mejascano@yahoo.de, velasco@at.fcen.uba.ar

RESUMEN

En este trabajo se utilizan imágenes NOAA - AVHRR para delimitar las áreas cubiertas con nieve en una zona de los Andes centrales. El análisis inicial visual de la combinación RGB 134 permitió separar las clases de cobertura: agua, suelo, nube, nieve. Posteriormente, mediante el análisis digital por bandas y por sus cocientes o diferencias y el uso del NDVI/NDSI, se enmascaran los píxeles no pertenecientes al manto nívico por fijación de umbrales. El resultado final es un mapa de cobertura de nieve que se integra con un mapa topográfico para evaluar cobertura de nieve por cuencas.

Palabras clave: Cobertura de nieve, AVHRR, Andes.

INTRODUCCIÓN

El dominio nival ordinario en la República Argentina (Bruniard, 1986; Snaider, 1999) se extiende sobre el sur y sobre el Oeste a lo largo de la cordillera de los Andes. La nieve se mide solamente en el interior de la Cordillera, donde su acumulación es hidrológicamente significativa y permite la elaboración de pronósticos estacionales de escurrimiento (Vallejos, 1973; Lascano, 2007). Existen diversos métodos para identificar tanto la acumulación como la fusión de la nieve pero en todos los casos el objetivo es obtener un dato puntual, en términos de mm equivalentes de agua nieve (EAN). Por otro lado, cabe mencionar que, en general, existen uno o a lo sumo dos puntos de monitoreo por cuenca. Esta densidad de información satisface ciertas necesidades de pronóstico y monitoreo, y por lo demás requiere una inversión pequeña y bajo costo de mantenimiento. En el caso de cuencas montañosas medianas, como las referidas en este trabajo, la posibilidad de extrapolación de datos puntuales de nieve se topa con dificultades, aún existiendo información para decenas de puntos medidos (Fassnacht et al., 2003). Es decir que, una estimación más directa del volumen del manto nival es aún un campo que merece amplia consideración.

En los Andes, el conocimiento de la extensión cubierta con nieve (manto nival) es una información valiosa que amplía el conocimiento de la cantidad de agua almacenada. Por otra parte, la cubierta nívica, es un estado de la superficie que afecta la determinación de los balances de radiación y agua que alimentan los modelos para estudios del clima y del ciclo hidrológico Cohen, 1994; Cohen y Enterkhabi, 2001; Frei y Robinson, 1998; Liston, 1999. Dada la importancia de conocer la distribución del manto nival y su evolución estacional, los datos provistos por los sensores remotos comenzaron a usarse con este fin a partir de 1966. El objetivo de este trabajo es profundizar la identificación y monitoreo de la extensión del manto nival como recurso informativo para la planificación hídrica. Para ello, se ensayan y definen algoritmos, que permiten separar las clases de cobertura del suelo a partir de la definición de umbrales, usando imágenes NOAA-AVHRR. A partir de éstos se genera un mapa de cobertura de nieve que se integra con una carta topográfica para evaluar la cobertura de nieve por cuenca.

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la cordillera de los Andes, entre los paralelos 35° y 38° S (figs. 1 y 2). Este tramo corresponde a las cuencas activas de los ríos Colorado y Neuquén (alto Neuquén). En razón de diversos factores este sector resulta óptimo para estudiar el manto nival estacional. Por un lado, el régimen estacional de ambos ríos muestra que en este sector de la Cordillera se produce el máximo nivel global de acumulación. Esto puede reconocerse en la magnitud del volumen de ambos escurrimientos desde fines de primavera hasta principios del verano, derivados casi totalmente del almacenamiento invernal (Bruniard, 1994; Lascano y Villalba, 2007). Por otro lado la altura media de la cordillera permite la conformación de un manto nival de extensión más o menos continua lo cual facilita la toma de muestras. Otra ventaja que ofrecen las cuencas activas de estos dos ríos es la poca o nula extensión de glaciares (Feruglio, 1957; Lascano y Villalba, 2007).

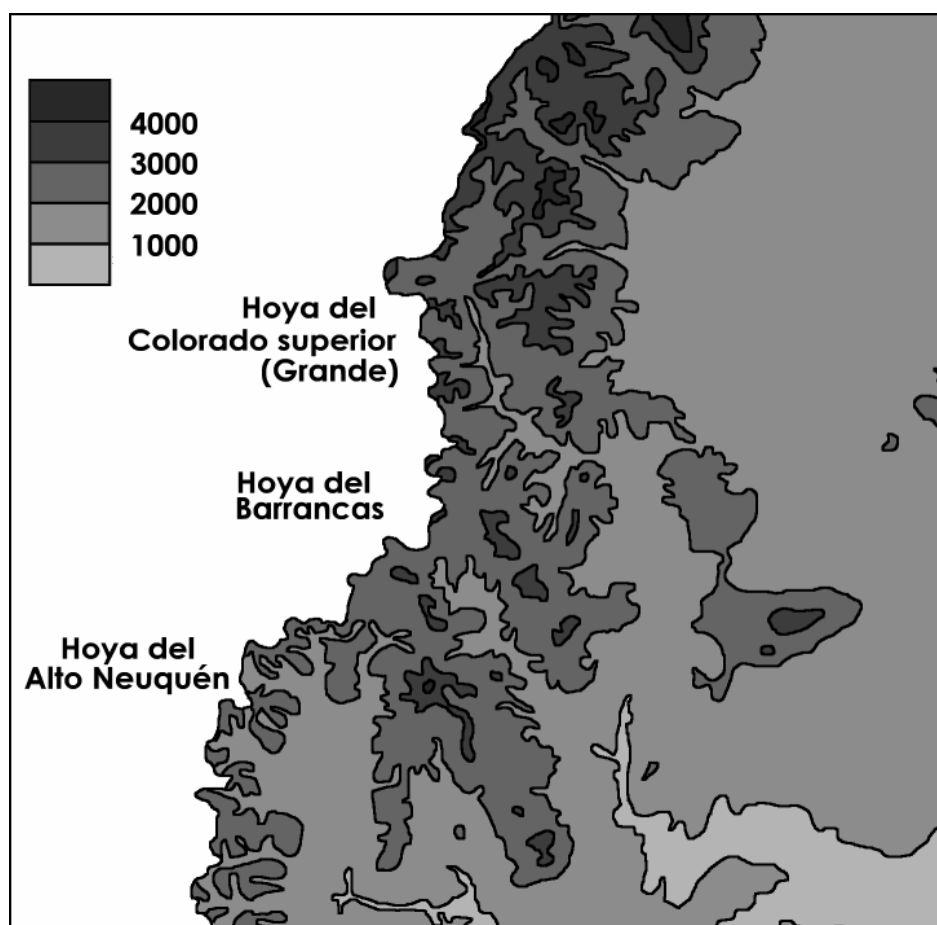


Fig. 1. Curvas de nivel en el sector argentino del área de estudio.

Datos y métodos

Datos

En este trabajo se utilizaron dos imágenes del satélite NOAA-16, disponibles en www.class.noaa.gov, correspondientes al año 2002, tomadas una a mediados de agosto y la otra a fines de septiembre. La primera fecha fue elegida con la intención de procesar información correspondiente a un manto nival de conformación intermedia. La progresión de la acumulación de nieve registrada por colchones de nieve (fig. 3) en el sector indica que luego de esa fecha se

produjeron otras precipitaciones de importancia (Argentina, 2006; Argentina, 2002). Al mismo tiempo esta primer fecha es previa al incremento primaveral de la radiación, elemento que puede modificar el estado de la nieve superficial (formación de horizontes de hielo, ver Corte, 1978).



Fig. 2. Área de estudio en imagen NOAA 16, 25 septiembre 2002 en blanco y negro de la combinación 1,3,4; y. superpuestas la cresta principal de los Andes (límite internacional), los límites de las cuencas activas analizadas y las ubicaciones de las estaciones de aforo de la SRH que reflejan la alimentación nival.

La toma de septiembre muestra la acumulación y extensión definitiva de la nieve que comenzará a derretirse a fines de primavera. Adicionalmente se utilizaron capas vectoriales modificadas del Atlas de los Recursos Hídricos de la Argentina (Argentina, 2002), y otras de elaboración propia para referenciar la extensión del manto nival en el área topográfica de aporte (ver figura 1). Las imágenes fueron calibradas, incluyendo la corrección de la banda 3 del NOAA-16.

Para caracterizar el estado de la superficie del manto nival al momento de la toma de las imágenes se utilizaron los datos de 2 colchones de nieve ubicados en la zona. Este instrumento mide el peso de la nieve que se acumula sobre una serie de paneles instalados en zonas relativamente planas al interior de los Andes. El peso es expresado en mm Equivalentes de Agua en Nieve (EAN). Una descripción completa de este dispositivo puede encontrarse en Menajovski *et al.* (2005). La ubicación de los dos colchones de nieve se muestra en la figura 2. En la figura 3 se observa la progresión de la acumulación de nieve en la zona, medida en mm de EAN. A los fines de este trabajo es importante rescatar sobre todo la fecha en que se produjeron tormentas. Puede observarse que pocos días antes del 12 de agosto se había producido una tormenta de relativa importancia. De esta forma puede estimarse que al momento de la toma de la imagen es poco probable que se produjera fusión, recrystalización y agregación de la nieve, proceso que tiene lugar en primer término sobre la superficie del manto nival. Adicionalmente debe tenerse en cuenta que la fecha en las que se registran pérdidas reflejan algo que sucede en la base. Este fenómeno, sin embargo, tiene relación con un proceso que comienza en superficie algunos días antes. En este sentido es interesante notar que luego del 12 de agosto el registro de EAN permanece estable, es decir no parece que hubiera fusión superficial durante los días previos. Esta inferencia se refuerza tomando en cuenta que sólo hacia fines de agosto se acelera el incremento estacional de la radiación solar.

En cuanto a las condiciones para la toma del 25 de septiembre la evolución del acumulado sobre los colchones estaría indicando la ocurrencia de una tormenta con mayor incidencia sobre el sur del sector, pero que igualmente produjo acumulación en el Valle Hermoso. De esta manera puede estimarse que para esta toma es también baja la probabilidad de que la superficie mostrara un nivel de cristalización significativo. Por lo tanto las dos tomas analizadas en este trabajo muestran la nieve en el mismo estado.

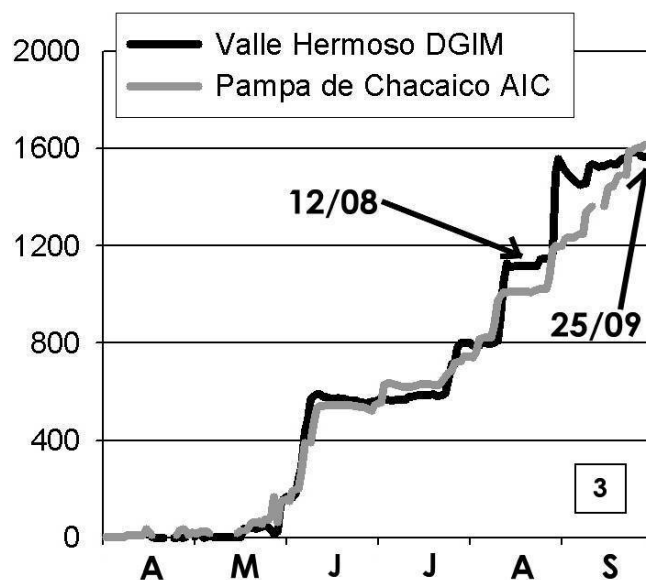


Fig. 3. EAN en dos puntos del área de estudio. Ver texto.

Métodos

En primer término se evaluó la diferenciación de la cobertura nival a partir de las combinaciones RGB 1,3,4 y 4,3,2. Como segundo paso se exploraron varios algoritmos que fueron aplicados a ambas tomas en su totalidad: el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI), el Índice Normalizado de Nieve (NDSI), así como de los cocientes B2/B1 y B3/B1 utilizados por Eastwood et al. (2004). También se calcularon las temperaturas de superficie (T_s), de la banda 4 (T4), de la banda 5 (T5), y finalmente la diferencia entre T4 y T5. Luego se tomaron muestras de los tipos generales de cobertura presentes en el sector, a saber suelo, nubes, nieves y agua, y se analizaron las diferencias entre ellas reflejadas en las 5 bandas originales y en los 8 parámetros calculados. Luego de elegir los algoritmos más eficaces se enmascaró la extensión del manto nival descartando de la imagen los otros tipos de superficie.

Debe hacerse una consideración aparte sobre el tratamiento de la presencia de nubes. Éste comienza en verdad al momento de la selección de las imágenes a procesar. En este sentido la recurrencia del NOAA permite contar con tomas en las que la presencia de nubes es mínima. Cabe destacar la particularidad del ambiente orográfico en cuanto a la nubosidad. Incluso en días despejados y calmos a escala regional, en los pedemontes o en torno a cordones muy sobresalientes pueden generarse circulaciones locales que den origen a pequeñas nubes, tanto en el borde como al interior de la extensión del manto nival. En este sentido el filtrado de esta nubosidad puede llevar a una subestimación de su extensión. Por esta razón se adopta como criterio no discriminar esta nubosidad. El cálculo de la superficie nevada se realiza entonces a partir del perímetro del manto nival.

En forma inversa, las nubes altas y delgadas, cuya presencia no está asociada a la orografía, tienen mayor extensión y tienen origen en la circulación de escala sinóptica. En este caso el comportamiento espectral puede llevar a sobreestimar la extensión de nieve. Por esta razón la presencia de estas nubes sí fue filtrada, aplicando el procedimiento que se explica en el apartado siguiente.

A partir de las combinaciones RGB 1,3,4 y 4,3,2 se obtuvo una diferenciación visual satisfactoria del manto nival. La cubierta de nieve que aparece en rojo en la imagen en color correspondiente a la figura 2, guarda relación directa con el relieve de la figura 1. En la imagen del 25 de septiembre la curva de 2000 metros sigue aproximadamente el límite de la cubierta de nieve. Al mismo tiempo, en el interior del área delimitada las rugosidades corresponden a las irregularidades topográficas identificables con la resolución del sensor. Por último debe mencionarse que con estas combinaciones también quedaron identificadas las nubes que al momento de las tomas se encontraban sobre el manto nival. Las nubes transparentes sólo pudieron identificarse parcialmente.

Es a partir de este primer resultado que se eligieron los sectores de las imágenes para obtener muestras que permitieran profundizar el análisis. En analogía con lo propuesto por Eastwood et al. (2004), se tomaron 3 muestras de 7x7 píxeles de cada tipo de superficie analizada. En cada caso, para cada banda y para los 8 parámetros calculados, se obtuvieron el promedio, el desvío estándar, el máximo y el mínimo. Estos resultados se plotearon para identificar el poder discriminante de cada banda o parámetro y se adoptaron los parámetros para los que un par de tipos de cobertura mostraron comportamiento excluyente. En la figura 4a aparecen los valores medios, máximos y mínimos representativos de la nieve y el agua, en el Índice de Vegetación. En este caso queda identificada la posibilidad de separar al agua de la nieve por el carácter mutuamente excluyente de las respuestas de estas dos coberturas al Índice.

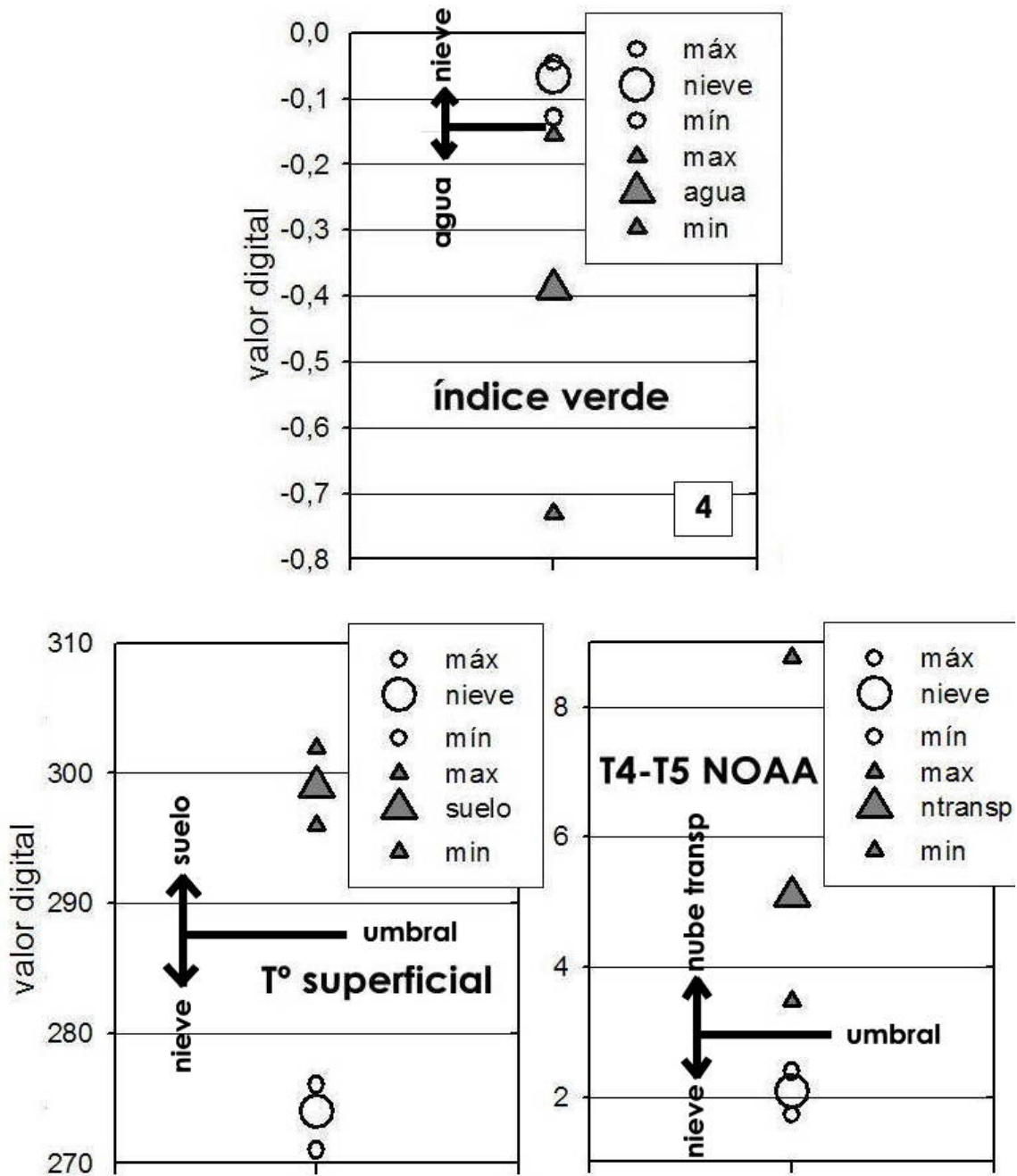


Fig. 4a) Valores promedios, máximos y mínimos de las muestras de nieve y agua del Índice de vegetación. 4b). Ídem de las muestras de nieve y suelo de la Temperatura superficial. 4c). Ídem de las muestras de nieve y nube transparente de la diferencia T4-T5.

En forma similar se identificó la respuesta excluyente respecto de la nieve para el suelo, con los valores de la temperatura superficial (T_s) que se obtiene a partir de las temperaturas de radiancia de las bandas 4 y 5 (Price, 1984). En la figura 4b muestran los valores medios, máximos y mínimos de T_s para las muestras de suelo utilizadas. Como último paso se filtró la presencia de nubes transparentes, que a diferencia de las nubes gruesas, no pueden identificarse en un análisis visual. La diferencia de las temperaturas radiantes (T_4-T_5) permite identificar muy claramente su presencia. La figura 4c muestra el valor medio y la dispersión de los valores de las nubes transparentes resultante de la diferencia T_4-T_5 . Luego de identificados, los umbrales, éstos fueron aplicados a las dos imágenes utilizadas para separar nieve del resto de las coberturas, que

no interesan a los objetivos del presente trabajo. Este procedimiento es escalonado, mediante la aplicación sucesiva de un umbral por vez. A partir de un algoritmo que evalúa si cada píxel esta sobre o por debajo del valor umbral, se asigna valor 1 a los píxeles correspondientes a la nieve, y 0 a los que representa cualquier otra cobertura, obteniéndose una imagen binaria, como la que se muestra en la figura 5.

Resultados

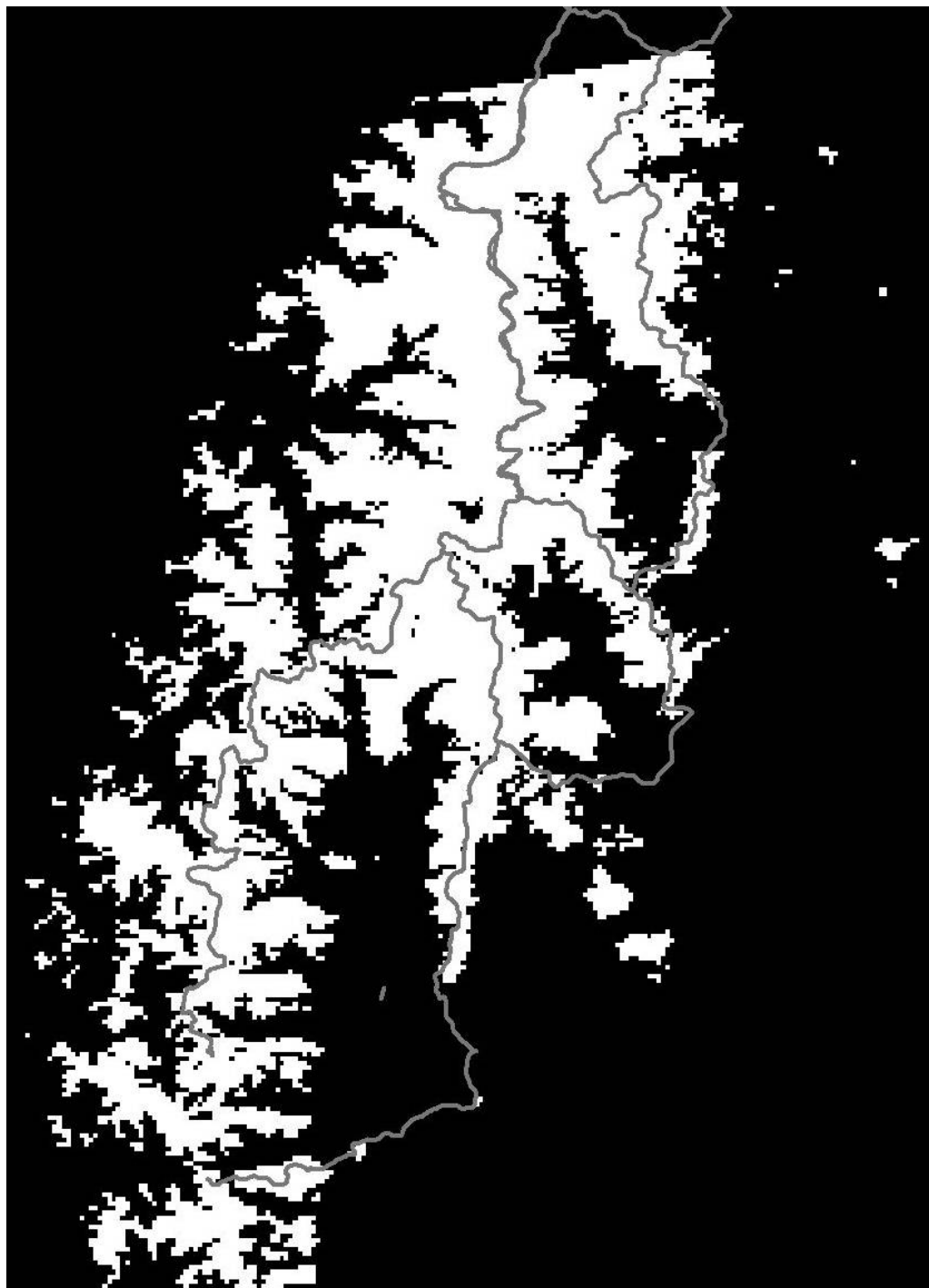


Fig.5: Máscara de la cobertura nívica estimada para el 25/09/02.

La figura 5 muestra el resultado de la aplicación de los tres filtros descriptos en el ítem anterior. La imagen obtenida constituye una máscara que puede tener distintas aplicaciones y constituye un nuevo plano de información. Este puede combinarse con la imagen original para destacar la superficie cubierta con nieve. Combinado con el plano de la carta topográfica permite ver la relación entre nieve y altura. El resultado refuerza la relación entre topografía y manto nival que sugiere la imagen original. Puede destacarse, por ejemplo, que la acumulación sobre los cordones externos es menor, como se observa a lo largo del tramo sureste de la cuenca del Colorado superior, así como sobre la cordillera del Tromen. Otro aspecto destacable es el angostamiento del área nevada de norte a sur: el límite internacional parece correr cada vez más estrechado en la faja de acumulación en cordillera. Si se combina este plano ahora con los perímetros de las cuencas activas, la comparación del porcentaje de cobertura nival de las tres cuencas arroja resultados interesantes. Al tratarse de una cobertura de nieve que refleja la acumulación estacional, las diferencias estarán relacionadas con características de los correspondientes regímenes de alimentación hidrológica. La figura 6 muestra la relación entre el porcentaje de cuenca activa y el valor medio del Índice de Estacionalidad (IE, ver definición en Lascano, 2005). En la gráfica se puede reconocer una relación directa: cuanto mayor es la proporción de la cuenca donde la nieve permanece almacenada hasta la primavera, más tardía es la estacionalidad del régimen fluvial (IE mayor).

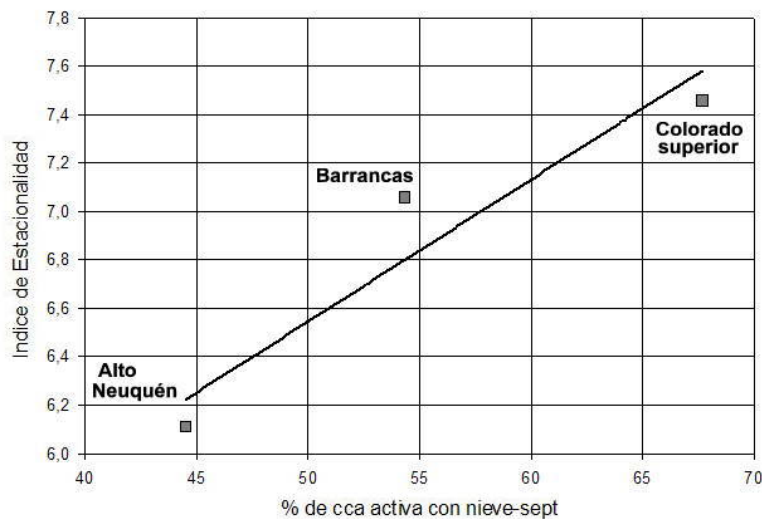


Figura 6: Relación entre Índice de Estacionalidad y porcentaje de cuenca activa cubierto.

Discusión y conclusiones

A partir del procesamiento de imágenes satelitales, se desarrolló una metodología que permitió evaluar la extensión del manto nival estacional, es decir, la suma de superficies cubiertas de nieve. Esta se derretirá al comenzar el ascenso de la isoterma de 0 °C a partir de mediados de primavera. Desde el punto de vista de la planificación hidrológica el mayor aprovechamiento de este dato puede darse en combinación con mediciones de EAN. El conocimiento del espesor acumulado permite estimar el volumen total de agua almacenado en forma de nieve. De la cuenca del Neuquén hacia el norte la precipitación en cordillera muestra una estacionalidad marcadamente regular: hacia mediados de septiembre cesan las tormentas invernales, y se instala

la sequedad de primavera y verano. Este patrón estacional refuerza la utilidad de los pronósticos estacionales de escurrimiento, ya que la ausencia de precipitaciones fuera del invierno asegura la exclusividad de la alimentación nival. Tanto para estimar en forma precisa el volumen del aporte que habrá de producir la nieve, como para proyectar su distribución mensual, es necesario que las mediciones de EAN se realicen a lo largo de los distintos escalones altimétricos del manto nival. Luego de permanecer en su nivel mínimo durante el invierno y parte de la primavera, la isoterma de 0 °C comienza un ascenso gradual que continúa hasta enero (Bruniard, 1994). Las variaciones de la extensión de la cobertura nival de septiembre, aunque leves, podrían implicar variaciones exponenciales en términos de volumen a escurrir, si se cuenta igualmente con valores de EAN en una transecta altimétrica.

La metodología aplicada en el presente trabajo con imágenes NOAA, no es directamente aplicable en otras cuencas de la cordillera central, donde deberá tenerse en cuenta la discontinuidad espacial de la acumulación estacional. En la cuenca activa del río San Juan, por ejemplo, la radiación, aún en invierno, derrite la nieve en los sectores más expuestos (N, NW, NE), de manera que la acumulación presenta un patrón netamente discontinuo. Los sensores remotos reflejan esta característica en los valores de píxel en el área nevada, promediando los comportamientos espectrales de la nieve y la ladera. La valorización de los datos de sensores remotos en este tipo de ambientes de acumulación podría ajustarse trabajando en simultáneo con imágenes de alta resolución espacial. La singular combinación de altitud, latitud y aridez de los Andes centrales, reconocida en el estudio de los glaciares de escombros, también debe tenerse en cuenta a la hora de realizar evaluaciones de nieve con sensores remotos.

Agradecimientos: A la SRH de la Nación, por la provisión de datos hidrológicos y meteorológicos. A la AIC del Comahue por los datos de EAN de Pampa de Chacaico. Este trabajo contó con el apoyo del subsidio UBACyT X239.

Referencias

- Argentina (2002). Subsecretaría de Recursos Hídricos. Atlas de los Recursos Hídricos de la Argentina. CD. Buenos Aires.
- Argentina (2003). Ministerio del Interior. Autoridad de cuencas de los ríos Neuquén Limay y Negro. Informe hidrometeorológico, diciembre de 2002. Cipolletti.
- Argentina (2006). Subsecretaría de Recursos Hídricos. EAN 2002. Datos en soporte digital facilitados al IANIGLA - CONICET. Buenos Aires.
- Bruniard, E. (1986). Aspectos geográficos de las precipitaciones nivales en la Argentina. *Boletín de Estudios Geográficos*. Instituto de Geografía. UNCuyo. Mendoza.
- Bruniard, E. (1994). Los regímenes fluviales de alimentación sólida en la República Argentina. Academia Nacional de Geografía, publicación especial n° 7. Buenos Aires.
- Cline, D. (1997). Snow surface exchanges and snowmelt at a continental midlatitude alpine site. *Water Resources Research*, 33 no. 4, 689-701. Abril 1997.
- Cohen, J (1994). Snow and climate. *Weather* 49, 150-155.
- Cohen, J; Entekhabi, D. (2001). The influence of snow cover on northern hemisphere climate variability. *Atmosphere-ocean*, 39, 35-53.
- Corte, A. (1978). Cateos de nieve y profundidad de congelamiento en Cuevas, cordillera de Mendoza, a 3.200 metros. *Anales del IANIGLA – CONICET*. Mendoza.
- Eastwood, S.; Odegaard, V.; Midtbo, K. (2004). Algorithms for assimilation of snow cover. Norwegian Meteorological Institute.
- Fassnacht, S.; Dressler, K; Bales, R. (2003). Snow water equivalent interpolation for the Colorado River Basin from snow telemetry (snotel) data. *Water Resources Research*, 39, no. 8, Agosto de 2003.
- Feruglio, E. (1957). Los glaciares de la cordillera argentina, tomo VII, 1° parte, Geografía de la República Argentina. GÆA Sociedad Argentina de Estudios Geográficos. Buenos Aires.

- Frei, A; Robinson, D. (1998). Evaluation of snow cover extent and its variability in atmospheric model intercomparison project. *Journal of Geophysical research*, 103, 8859-8871.
- Lascano, M. E. (2005). Análisis interanual de la estacionalidad de los ríos andinos. Contribuciones científicas 2005. GÆA, Sociedad Argentina de Estudios Geográficos. Buenos Aires.
- Lascano, M. E. (2007). Dónde y cómo se mide la nieve en los Andes. Contribuciones científicas 2007. GÆA Sociedad Argentina de Estudios geográficos. Buenos Aires. 2007.
- Lascano, M. Villalba, R. (2007). Algunas precisiones sobre el rol de los glaciares en el escurrimiento andino. CONAGUA 2007. Tucumán. www.infraestructura.co.nr ► cuencas hídricas
- Liston, G. (1999). Interrelationships between snow cover, snowmelt and snowcover depletion : implications for atmospheric, hydrologic and ecologic modeling. *Journal of applied meteorology* 38, 1474-1487.
- Menajovsky, S.; Lima, D.; Ferrer, M. (2005). Un método para el contraste de colchones de nieve. Congreso Nacional del Agua. CD. Mendoza.
- Price, J. C. (1984). Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 advanced very high resolution radiometer. *J. of Geophysical Research*, Vol. 89, D5, 7231-7237
- Snaider, P. (1999). Las precipitaciones nivales en la República Argentina. Secretaría de Ciencia y Técnica- Universidad Nacional del Nordeste. Informe inédito. Resistencia. Resumen presentado en las IV Jornadas de Geografía Física. Universidad Católica de Santa Fe. Santa Fe. 2000.
- Vallejos, R. M. (1973). Estudios nivológicos en los Andes cuyanos. En “El agua y el futuro regional”. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza.