SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

VI CONGRESO NACIONAL

MEDICION DE LA VARIABLE COBERTURA DE NIEVE Y SU APLICACION AL ESTUDIO DEL DESHIELO EN CUENCAS ANDINAS CHILENAS

Mauricio Araya F. (1)

Alejandro Farías O. (2)

Humberto Peña T. (3)

R E S U M E N

Este trabajo contiene los principales aspectos de una investigación desarrollada para la medición de superficie cubierta de nieve (cobertura) en cuencas de la Cordillera de Los Andes, Zona Central de Chile, con miras a su empleo en la elaboración de pronósticos de deshielo. En primer lugar se presentan los antecedentes básicos que dieron origen a este estudio, producto de un Convenio suscrito entre la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas y la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Enseguida se plantean los principales problemas relacionados con el estudio de la cobertura de nieve, utilizando fotografías aéreas e imágenes de satélites en especial, en términos de oportunidad, calidad y costo de observación y procesamiento. Posteriormente se entregan los aspectos principales sobre determinación de la metodología más adecuada para la medición de cobertura, considerando las limitaciones actuales existentes a nivel nacional e internacional. Una aplicación concreta, realizada en la cuenca nival del río Aconcagua, muestra que la determinación del valor de cobertura puede realizarse satisfactoriamente, con precisión adecuada y con un procesamiento rápido, simple y a bajo costo, utilizando imágenes Landsat ampliadas por proyección contra una base cartográfica instalada en un telón rígido, con movimientos en los tres ejes, para corregir las distorsiones de las imágenes primarias utilizadas. Además, se advierte la utilidad potencial que esta variable posee en la elaboración de pronósticos de volúmenes de deshielo. Finalmente se incluyen las conclusiones y recomendaciones más significativas derivadas de esta investigación, teniendo en cuenta especialmente la necesidad de realizar estudios más completos (incluyendo estadísticas más largas y un mayor número de cuencas) y los mejoramientos que serán introducidos proximamente al sistema de observación del planeta mediante satélites artificiales (satélite francés SPOT, 1985).

(1) Ingeniero Civil, Sec.Percepción Remota, Fac. Cs. FF y MM, Universidad de Chile
(2) Ingeniero Civil, Universidad de Chile
(3) Ingeniero Civil, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas

1. ANTECEDENTES BASICOS

La variable superficie cubierta de nieve (cobertura) puede ser de gran utilidad en el estudio del deshielo, al utilizarla como parámetro en situaciones como: elaboración de pronósticos de volumen total de deshielo para la temporada y la distribución de este volumen durante la temporada, determinación de tasas de derretimiento, actualización de pronósticos y elaboración de pronósticos de corto plazo.

En el caso de Chile, este hecho puede ser de especial importancia, considerando que el suministro de agua durante la temporada seca primavera-verano en la Zona Central del país, depende casi exclusivamente del deshielo. La necesidad de contar con adecuados pronósticos de deshielo durante este período es evidente, ya que en esta zona del país se concentra la mayor parte de la población y los principales centros de producción agrícola y de generación hidroeléctrica, que deben optimizar el uso de este recurso, ya escaso en la actualidad.

El modelamiento hidrológico de las 11 cuencas andinas principales existentes en la Zona Central de Chile, aproximadamente entre los 27°S y 37°S de latitud, se ve favorecido por la relativa homogeneidad geomorfológica de éstas. Sin embargo, la dificultad para obtener el valor de cobertura forma periódica, oportuna, confiable y económica, ha complicado el usarla como variable, tanto en Chile como internacionalmente. Como consecuencia, existe un escaso desarrollo, a nivel internacional, de modelos hidrológicos que utilicen la cobertura como una variable independiente o parámetro de decisión, en particular para estudios de pronóstico de volúmenes de deshielo.

Los nuevos productos actualmente disponibles (fotografías aéreas e imágenes de satélites) permiten determinar, directamente, la distribución real del manto de nieve en sentido horizontal y vertical (al superponer información de curvas de nivel a productos de visión plana o estereoscópica, se logra una excelente determinación de la altura real de toda la línea de nieve). Por otra parte, el uso de imágenes multiespectrales (visible, infrarrojo, etc.) permite determinar parámetros adicionales de gran interés, como la porción del manto de nieve que está en evidente estado de fusión (Figura 1). Si bien, por ahora, sólo es posible estudiar esta característica en forma más bien cualitativa, se espera muy prontamente poder definir la forma de determinar este parámetro, confiablemente, en forma cuantitativa.

Aunque actualmente no es posible afirmar, fehacientemente, que la variable cobertura es totalmente confiable para ser empleada cuantitativamente en modelos de pronóstico de deshielo, las experiencias desarrolladas en otros países arrojan resultados preliminares altamente positivos (Rango A., 1978; Marbouty et al, 1978; Schumann H., 1975). En consecuencia, una confirmación definitiva al respecto, podrá ser obtenida en pocos años más, a la luz del análisis de modelos hidrológicos que hayan utilizado esta variable, considerando varios años de estadística y cuencas con diferentes condiciones ambientales. De todas maneras, desde un punto de vista cualitativo, el valor de esta variable en estudios de deshielo es indudable. Además, la determinación directa de cobertura puede ser de gran utilidad en los modelos de predicción de caudal de deshielo de corto plazo (a base de variables meteorológicas), pues estos modelos sólo darán buenos resultados en la medida en que se conozca la cobertura real, que corresponde al sector de la cuenca que realmente está aportando al caudal de deshielo. También se sabe que la tasa a la cual se reduce la cobertura de nieve (retroceso), es un índice inversamente proporcional al equivalente en agua de la nieve y al flujo generado por el derretimiento (Rango A. y Solomonson V., 1975).

Los actuales satélites de estudio de recursos naturales obtienen imágenes apropiadas para la medición de cobertura y , además, reunen las condiciones de periodicidad, economía y seguridad que son necesarias en este tipo aplicaciones. Sin embargo, los sistemas internacionales de adquisición, pre-procesamiento y distribución de imágenes, adolecen aún de graves problemas para asegurar un acceso oportuno y rápido a estos productos. Por otro lado, los productos primarios entregados por las estaciones receptoras de imágenes de satélites(Landsat), presentan una serie de problemas(ej: distorsiones geométricas y radiométricas), que dificultan o hacen imprecisa la medición de cobertura si no se cuenta con los sistemas adecuados de corrección. Los principales aspectos sobre estos problemas se resumen en el punto siguiente (2). El empleo de técnicas analógicas (fotográficas) y digitales (computacionales) resultan de gran utilidad para procesar las imágenes y corregir estos defectos. Sin embargo, estas técnicas presentan grandes diferencias entre si, en términos de costos, rapidez y precisión de procesamiento, las que deben tenerse también muy en cuenta para desarrollar la metodología más adecuada para la determinación de cobertura.

Las diferentes alternativas de medición de cobertura utilizadas en otros países no son aplicables directamente en Chile, dadas las diferentes característi-

cas de las cuencas para las cuales fueron desarrolladas y las diferentes facilidades tecnológicas que las respaldan, características que aparecen reflejadas en los diferentes grados de precisión, tiempos y costos de procesamiento logrados con estas metodologías.

Es así como en algunos casos se da énfasis al procesamiento digital de las imágenes (se logra buena precisión pero con un alto costo relativo, según se verá en el punto 2) o se contemplan métodos analógicos con correcciones muy primarias en la geometría y radiometría de las imágenes (con la consiguiente pérdida de precisión en la medición de cobertura) o se utilizan imágenes obtenidas por satélites meteorológicos (Lillerand et al, 1982). En relación a este último punto, las imágenes de satélites meteorológicos tienen la gran ventaja de su excelente periodicidad (cada 24 horas para los satélites de órbita polar NOAA,TIROS; cada 30 minutos para los satélites geoestacionarios GOES) pero tienen el grave problema de la baja resolución espacial de sus imágenes (1 y 10 km, en comparación con los 80 metros del actual satélite Landsat). Esto último significa que la línea de nieve se puede determinar, en el mejor de los casos, con 1 o 10 km de incerteza, dependiendo del tipo de imagen utilizada; si además se consideran los problemas mencionados en 2.1.4 (relacionados con la identificación del manto de nieve), se puede concluir que el empleo de imágenes de satélites meteorológicos no resulta adecuado para cuencas andinas chilenas, ya que las cuencas ubicadas en la Zona Central del país tienen, en general, un alto rendimiento durante la temporada de deshielo (por lo que una incerteza de 10 km en la determinación de la línea de nieve en la medición de cobertura resulta inaceptable). En todo caso, desde un punto de vista cualitativo, estas imágenes meteorológicas pueden resultar de gran utilidad si no se dispone de productos alternativos con mejor resolución espacial.

Considerando todos los antecedentes anteriormente expuestos, queda en evidencia la necesidad de contar con una metodología adecuada para la medición de cobertura en cuencas andinas chilenas, que tenga en cuenta las limitaciones existentes a nivel internacional y nacional. Los resultados a continuación expuestos se han derivado de una investigación realizada expresamente con este objetivo, considerando la importancia que este problema reviste para el país. Esta investigación fue desarrollada gracias a un Convenio suscrito entre la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas y la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (Sección Percepción Remota, Departamento de Geología y Geofísica). Se contó además con la valiosa colaboración del Departamento

de Desarrollo de la Investigación de la Universidad de Chile y del Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile (SAF), para el procesamiento fotográfico (B/N y color) y digital (CADI: Centro de Análisis Digital de Imágenes, del S.A.F.) de las imágenes del satélite Landsat y los antecedentes sobre el empleo de fotografías aéreas. Para mayores detalles sobre la investigación desarrollada, se puede recurrir a la bibliografía especializada (Farías A., 1983; Araya M.,1982).

2. PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA MEDICION DE COBERTURA

El uso de fotografías aéreas e imágenes de satélites es prácticamente el único medio que permite, en la actualidad, lograr valores reales y confiables de cobertura. Los métodos para determinar profundidad de la nieve desde el espacio, estan aún en etapas demasiado preliminares, por lo que no fueron considerados en este estudio. El empleo de fotografías aéreas o imágenes de satélites tiene ventajas y desventajas en cada caso, que pueden hacer más recomendable uno u otro producto, dependiendo del problema considerado. Para este estudio se optó finalmente por el empleo de imágenes multiespectrales y multitemporales del satélite Landsat, procesadas analógicamente según la metodología desarrollada y descrita en el punto 3, principalmente por razones de costos, facilidad y rapidez de procesamiento. Mayores detalles sobre las consideraciones que motivaron esta decisión se encuentran en (Farías A., 1983). Los principales problemas relacionados con la medición de cobertura, tanto en fotografías aéreas e imágenes de satélites son: 1) Acceso seguro y expedito a la información; 2) Calidad adecuada de los productos primarios generados; 3) Costos de adquisición y procesamiento; 4) Interpretación adecuada de la información. Los principales aspectos al respecto, en particular para imágenes Landsat, se resumen a continuación.

2.1. Acceso seguro y expedito a la información.

a) Seguridad en la fecha de adquisición de la imagen. Actualmente es posible programar adecuadamente la adquisición periódica de imágenes sobre cualquier zona de Chile, pues las estaciones receptoras Landsat operadas por el Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) de Brasil (desde 1977) y la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (CNIE) de Argetina (desde 1982) cubren el territorio nacional desde Arica a Concepción y, Arica a Punta Arenas, respectivamente. O sea la Zona Central de Chile está cubierta por ambas estaciones. Anteriormente (1972-76) ésto no era posible ,al existir estaciones receptoras sólo en EEUU que debían atender

todas las solicitudes internacionales, lo que significaba en la práctica poder contar con una imagen al año, aproximadamente.

b) Condiciones climatológicas adversas. El satélite Landsat puede tomar una imagen en vista vertical, de cualquier zona del planeta, cada 18 días. Este período de retorno puede ser un problema en épocas de invierno, debido a las frecuentes condiciones de nubosidad (lo que impediría una adquisición mensual). El satélite francés SPOT (1985), al poder tomar vistas oblicuas (reprocesables para generar vistas verticales), permitirá reducir este período de observación a 5 días, contándose así con 6 oportunidades de toma por mes y no 2, como ocurre actualmente con el satélite Landsat.

c) Rapidez en la distribución de los datos. En la actualidad el tiempo transcurrido entre la toma de la imagen y su llegada al usuario, es de 1 a 2 meses, lo que resulta inadecuado para fines de pronóstico de deshielo. Si bien este retraso es un poco menor para los investigadores de países que poseen estaciones receptoras propias, el problema en realidad corresponde a una limitación técnica en los actuales sistemas de procesamiento y distribución de productos. A futuro se espera mejorar estas condiciones (Argentina y Brasil ya lo están haciendo) e incluso, el sistema SPOT está programado para reducir este período de espera a 2 semanas, lo que ya sería adecuado para elaboración de pronósticos de deshielo.

2.2. Calidad adecuada de los productos primarios generados.

Existen cinco aspectos importantes al respecto.

a) Periodicidad adecuada de observación. Sería necesario una mayor periodicidad de observación, ya que en la práctica el satélite Landsat proporciona una observación mensual, siendo lo ideal una imagen semanal o quincenal.

b) Resolución espacial o nivel de detalle. Según se vio, existe un compromiso entre la resolución espacial y la periodicidad de observación (inversamente relacionadas). Como la resolución mínima necesaria es del orden de los 100 metros (escalas tipo 1: 250.000), el único sistema que satisface este requerimiento es el Landsat (80 m),con la consiguiente limitación en su periodicidad de observación (18 días). El sistema SPOT resultará ideal, pues contará con resolución de 10 m (visible,B/N) y 20 m (multiespectral, color), lo que significará trabajar con escalas tipo 1:100.000 a 1:50.000, con observaciones cada 5 días, si fuese necesario.

c) Visión estereoscópica. Aunque esta característica no es necesaria para la medición de cobertura (extensión superficial, en proyección horizontal, del manto de nieve), sí es importante para tener una adecuada visión del relieve y poder definir zonas de nieve en laderas en sombra, etc. Si bien las imágenes Landsat no proporcionan visión estereoscópica, el bajo ángulo de iluminación solar (9:30 A.M.) con que son tomadas, da una adecuada sensación de relieve. Las imágenes SPOT tendrán capacidad estereoscópica, al poder ser obtenidas en vistas oblicuas desde órbitas consecutivas.

d) Distorsiones geométricas. Las imágenes proporcionadas por las estaciones receptoras de imágenes Landsat, pueden presentar distorsiones significativas (a veces del orden del 10%, independientemente en la escala en sentido transversal o longitudinal de la imagen), lo que representa un obstáculo para la medición precisa de cobertura. La corrección de estas distorsiones (ya sea en forma digital o analógica) sólo es posible mediante el apoyo de puntos geográficos de control, proceso que puede tornarse muy engorroso, dependiendo de la metodología empleada.

e) Distorsiones radiométricas. Muchas veces la escala de grises se satura hacia los tonos"blancos" o"negros", dificultando la identificación de la nieve en zonas de roca de alta reflectancia o en laderas con sombras, respectivamente. Este problema es frecuente en productos fotográficos no controlados adecuadamente.

2.3. Costos de adquisición y procesamiento.

Estos costos difieren sustancialmente, según se trate de productos analógicos (fotográficos) o digitales (cintas compatibles con computador, CCT).

a) Productos analógicos. Normalmente es necesario adquirir 3 bandas espectrales (diapositivos o negativos B/N, escala 1: 1.000.000), a US$ 50 c/u. El costo de procesamiento, según la metodología desarrollada, es de unos US$ 50 por banda, lo que totaliza, para adquisición y procesamiento, unos US$ 300 por imagen (cada imagen cubre una zona de 185x185 km, lo que normalmente basta para cubrir una cuenca nival completa).

b) Productos digitales. Una cinta digital (correspondiente a una imagen de 185x 185 km, con cuatro bandas espectrales) cuesta alrededor de US$ 2.500. El costo de procesamiento asociado (incluyendo generación de productos finales) es de unos

US$ 1.000 por cinta, lo que totaliza, para adquisición y procesamiento, unos US$ 2.500 por imagen. Como referencia, un levantamiento aéreo, con fotografías a escala original tipo 1:100.000, para una zona de unos 100x100 km cuesta alrededor de US$ 3.500 (a 78$/US$, en 1983), incluyendo adquisición y procesamiento.

2.4. Interpretación adecuada de la información.

Suponiendo superados los anteriores problemas, aún resta la parte final del asunto, relacionada con la identificación confiable de la superficie nevada y su posterior cuantificación (medición de cobertura). Los principales problemas relacionados con la identificación confiable del manto de nieve son:

a) Zonas de rocas de alta reflectancia. Este problema es común en ciertas cuencas andinas y se acentúa al existir distorsiones radiométricas en los productos primarios utilizados (saturación hacia los "blancos"). El uso de varias bandas espectrales (y las correspondientes composiciones en colores) resulta de gran utilidad para resolver este problema.

b) Presencia de nubes. La banda MSS-7 del Landsat (0.8 - 1.1 um, infrarrojo cercano) penetra la nubosidad tenue,normalmente presente en la alta cordillera, permitiendo trazar la línea de nieve. La banda MSS-5 (0.6 - 0.7 um, rojo), tradicionalmente empleada para medir cobertura (Barnes J. y Clinton J., 1974), no tiene esta capacidad de penetración. Debe tenerse presente al usar la banda MSS-7 que ésta siempre arrojará valores menores de cobertura en comparación con la banda MSS-5, debido a las características de reflectancia de la nieve refundida (Fig.1). Otros factores que ayudan a diferenciar nieve de nubes son la textura aldonosa de las nubes, la superposición de curvas de nivel (la nieve sigue normalmente una curva de nivel determinada, no así las nubes) y las sombras presentes bajo las nubes (dado el bajo ángulo de iluminación solar existente al tomar la imagen).

c) Zonas de sombras. La no consideración de las zonas nevadas en laderas con sombras puede dar valores de cobertura menores a los reales. Para solucionar este problema (que se acentúa al existir saturación hacia los tonos "negros"), debe superponerse información de curvas de nivel e inferir la presencia de nieve en zonas con sombras (la nieve normalmente sigue una curva de nivel determinada).

d) Vegetación en zonas nevadas. Afortunadamente este problema no se presenta en

mayormente en las cuencas andinas chilenas, debido a la gran altura en que se ubica la línea de nieve. En todo caso, el empleo de composiciones en colores permite contrastar en buena forma los distintos tipos de rocas, vegetación y nieve.

Finalmente, la medición de cobertura puede realizarse con métodos analógicos (planímetro) o digitales (conteo computacional de los elementos de imagen, 80 x 80 m, correspondientes a nieve), sin mayores problemas. En esta fase se advierte la ventaja del procesamiento digital de imágenes, sobre todo en imágenes tomadas cuando el deshielo está muy avanzado y la nieve está presente en numerosos manchones aislados, de pequeñas dimensiones (Fig. 2).

3. DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA DE MEDICION DE COBERTURA

Considerando los antecedentes anteriormente expuestos, se desarrolló la metodología más adecuada para la medición de cobertura, teniendo en cuenta especialmente las características de las cuencas andinas chilenas y las limitaciones tecnológicas y de infraestructura existentes a nivel nacional e internacional. Las principales consideraciones sobre la metodología desarrollada pueden resumirse como sigue.

3.1. Adquisición de Productos Primarios.

Por razones de costos, principalmente, se eligieron productos analógicos de imágenes Landsat, materializadas en diapositivos blanco/negro, escala 1: 1.000.000, bandas MSS-4,5 y 7. Estos diapositivos se emplean separadamente o en composiciones a color, realizadas con técnicas muy simples y de bajo costo, por medio de un equipo Diazo que permite obtener transparencias en colores diferentes para cada banda, a través del uso de películas sensibles con diferentes emulsiones para cada color.

No se seleccionaron los demás productos fotográficos disponibles en los centros receptores (ampliaciones en papel B/N o color, en escalas 1: 1.000.000 a 1: 250.000), por razones de costos y flexibilidad para el cambio de escalas y corrección de distorsiones geométricas y radiométricas.

Es conveniente adquirir directamente los productos primarios en los centros receptores (Argentina o Brasil), para asegurar una calidad de primera generación, necesaria para estos estudios.

3.2. Sistema de procesamiento.

En la selección y desarrollo de la metodología de medición de cobertura se consideraron sistemas analógicos y digitales de procesamiento.

El procesamiento digital se evaluó en el Centro de Análisis Digital de Imágenes (CADI) del Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile (SAF). Se utilizó una cinta digital de una imagen Landsat sobre la zona de Santiago, que incluía completamente la cuenca del río Aconcagua; los productos finales se materializaron en copias en papel color (Polaroid) y negativos y diapositivos color (y sus correspondientes ampliaciones). Se pudo constatar la ventaja de este sistema en la medición de cobertura, para épocas de deshielo avanzado, donde la medición de este manto discontinuo de nieve se dificulta al utilizar técnicas analógicas. La elección de los niveles de grises correspondientes a nieve se puede realizar en forma bastante confiable, al tomar varios puntos de control (incluyendo zonas de nieve en laderas con sombra o con rocas de alta reflectancia). La labor supervisora del investigador es muy importante para el trazado de la cuenca y la modificación de las zonas de nieve reconocidas por el computador (agregando o descartando zonas nevadas, según sea el caso), las que a veces no son correctas por problemas especiales de reflectancia (rocas o sombras). Aunque no estaban disponibles, es posible desarrollar los subprogramas necesarios para superponer información de curvas de nivel, superponer el límite de la cuenca para distintas imágenes (correspondientes a diferentes fechas de observación), delimitación automática de la nieve dentro y fuera de la cuenca, etc., lo que haría más flexible el sistema aún. Sin embargo, por razones de costos frente a la metodología finalmente desarrollada, no se seleccionó este tipo de procesamiento.

En cuanto al procesamiento analógico, fue necesario evaluar cuatro alternativas: a) Ampliaciones fotográficas B/N y color. Los problemas de costos y precisión geométrica y radiométrica de los procesos (normalmente fuera del control directo del investigador) hicieron descartar esta alternativa. b) Ampliaciones sectoriales a través del uso de instrumental especializado (Zoom Transfer Scope). A pesar de que este sistema permite utilizar directamente los productos primarios adquiridos directamente de los centros receptores (copia de contacto a papel B/N es preferible para no dañar los originales), existen ciertas limitaciones operativas en la ampliación y correción de las escalas, lo que sumado al alto costo del instrumento, permitió deshechar esta alternativa de procesamiento. c) Ampliaciones por proyección de diapositivas. Aunque este método resulta muy adecuado, al proyectar las imágenes sobre un telón rígido abatible en los tres ejes (para corregir distorsiones geométricas de las imágenes, al proyectarlas sobre una base cartográfica actualizada), el traspaso de los productos originales a diapositivos (B/N o color) de 35mm o 60 mm (utilizando un proyector especial) hace perder calidad a los productos primarios, por lo que este sistema fue también descartado. d) Ampliaciones por proyección de los productos primarios originales. Mediante el empleo de un retroproyector, es posible ampliar directamente los productos originales, en bandas separadas B/N o en composiciones a color. La corrección geométrica de las imágenes se logra mediante su proyección contra una base cartográfica modificada (actualizada con imágenes Landsat RBV de alta resolución, 40 m, o imágenes MSS, disponibles más fácilmente), la que está sobre un telón rígido (de vidrio, para facilitar traspaso de la línea de nieve sobre la carta topográfica), el que se puede abatir en los tres ejes, para hacer calzar ambos elementos (imagen y base cartográfica modificada). Dadas sus ventajosas características, resumidas a continuación, se seleccionó finalmente este sistema como el más adecuado para medir cobertura mediante imágenes del satélite Landsat.

3.3. Características principales de la metodología seleccionada.

La metodología de medición desarrollada resulta de una extraordinaria simpleza y seguridad, lo que sumado a su bajo costo relativo, permite emplearla operacionalmente en la medición de cobertura en cuencas andinas chilenas.

La simplicidad del procedimiento es obvia. En el caso de una cuenca demasiado extensa (que deba ser cubierta por dos imágenes o que involucre gran parte de una), es posible hacer calzar parcialmente la cuenca, dividiéndola en dos o tres sectores y sumando los valores parciales de cobertura, para lograr así mayor precisión en la medida. De acuerdo a los valores experimentalmente obtenidos, al realizar la medición diferentes operadores y en varias ocasiones, los valores no difieren entre si más de un 1% en promedio. La escala más adecuada de trabajo, compatible con la resolución de las imágenes Landsat, resultó ser 1:250.000.

La rapidez del procesamiento es otra característica importante, no siendo necesarias, en promedio, más de 3 horas por imagen (empleando productos B/N y color). El bajo costo involucrado (alrededor de US$ 300, en total, por imagen), la simplicidad de los instrumentos empleados (el telón rígido transparente abatible puede ser construído fácilmente y a bajo costo) y el total control que posee

el investigador sobre todo el desarrollo del proceso de medición de cobertura (muy importante para corregir adecuadamente las distorsiones geométricas y radiométricas de las imágenes, con la consiguiente precisión en la identificación y cuantificación del manto de nieve), representan características adicionales que hacen recomendable esta metodología para la medición rutinaria de cobertura, según quedó demostrado en la aplicación práctica realizada en la cuenca nival del río Aconcagua y cuyos resultados se resumen a continuación.

4. APLICACION DE LAS DETERMINACIONES DE COBERTURA EN LA CUENCA DEL RIO ACONCAGUA AL PRONOSTICO DE CAUDALES DE DESHIELO

Los buenos resultados obtenidos en el desarrollo de una metodología de medición de cobertura y la existencia de imágenes MSS Landsat, que incluyen la cuenca nival del río Aconcagua, hicieron de interés la aplicación práctica de la experiencia recogida en esa cuenca, con el propósito de evaluar las posibilidades de uso de la cobertura de nieve en el pronóstico de caudales.

Es necesario señalar que , como las imágenes disponibles (21) permiten hacer mediciones periódicas de cobertura en sólo tres períodos de deshielo, no es posible desarrollar modelos elaborados que requieran mayor extensión de la estadística, con posibilidades de un estudio hidrológico-estadístico más profundo.

4.1. Medición de cobertura

Para la medición de cobertura, la cuenca nival del río Aconcagua se dividió en dos subcuencas, determinadas por la ubicación de las estaciones fluviométricas Colorado en Colorado y Aconcagua en los Quilos, que incluyen la cuenca del río Colorado (830 km^2) y las cuencas de los ríos Juncal y Blanco (1.140 km^2), respectivamente.

De las 21 imágenes disponibles (identificadas con la fecha del día de toma de la imagen), 4 imágenes no permitieron la medición de cobertura debido, principalmente, a la presencia de nubes sobre la zona de interés. De las 17 imágenes utilizables, 5 corresponden a la temporada 1975-76, 8 al período 1977-78 (con fechas muy bien distribuidas) y las 4 imágenes restantes corresponden al deshielo 1978-79.

En estas imágenes, mediante la metodología desarrollada, se midió cobertura en las dos subcuencas anteriormente consideradas. Los valores de cobertura (inicialmente obtenidos en km^2) son llevados en valores porcentuales al gráfico de la Figura 3, que representa el retroceso del manto de nieve, con los días y meses de la temporada de deshielo en las abcisas. Del análisis de las curvas se observa la relación que existe entre el comportamiento del retroceso del manto con el equivalente en agua de la nieve acumulada. Aunque no se dispuso de todos los valores de cobertura al inicio de la temporada (septiembre), se puede extrapolar que generalmente ésta alcanza valores entre un 87% y un 93% , independiente del año; sin embargo, ya en octubre la diferencia de cobertura y la velocidad de retroceso es notable entre los años considerados. La velocidad de retroceso tiene relación con el equivalente en agua de la nieve: a una mayor velocidad de retroceso corresponde un menor volumen total de deshielo y viceversa.

El adelantamiento del retroceso en la subcuenca del río Colorado es razonable, si se tiene en cuenta que la altura media de ésta es relativamente menor a la altura media de las subcuencas de los ríos Juncal y Blanco.

4.2. Volúmenes de deshielo.

Los volúmenes de deshielo se calcularon a base de la serie de caudales medios diarios, medidos y proporcionados por la Dirección General de Aguas. La estadística se completó diariamente , con métodos gráficos y analíticos, basándose principalmente en los valores más confiables de la estación fluviométrica Aconcagua en Chacabuquito. La alteración provocada por la operación de la central hidroeléctrica Los Quilos, cuyas captaciones se ubican aguas arriba de las estaciones de aforo, fue corregida agregando los caudales que son extraídos.

La serie de caudales medios diarios, ya completa y corregida, se acumuló diariamente a partir del 1° de septiembre, con totales parciales cada 5 días. De esta forma se dispone fácilmente del volumen escurrido a la fecha, para cualquier día de la temporada de deshielo. Esta acumulación diaria de caudales se hizo para las tre temporadas en estudio y en las dos estaciones fluviométricas consideradas.

4.3. Relaciones entre cobertura y volúmenes de deshielo.

Las relaciones buscadas no incluyen variables hidrometeorológicas y so-

lamente se relacionaron la cobertura y el volumen de deshielo.

Los intentos de relacionar cobertura con volúmenes en el corto plazo (semanales o quincenales), definitivamente no dieron buenos resultados, debido a que para estos cortos períodos de tiempo las variables meteorológicas tienen mayor importancia.

Al relacionar valores absolutos de cobertura (km^2) y de volumen (Mm^3), controlados en distintas fechas de una sola temporada de deshielo y de una misma subcuenca, se logran buenos ajustes mediante regresiones lineales ($y = Ax + B$), con coeficientes de correlación (r) siempre mayores a 0,9. Para el período 1977-78, con mayor validez estadística por disponerse de ocho mediciones de cobertura bien distribuídas en el tiempo, el ajuste lineal es óptimo y el coeficiente de correlación es mayor a 0,99 en ambas subcuencas.

De acuerdo a lo anterior, se podrían usar regresiones lineales calculadas en base a valores de cobertura y volumen medidos al inicio de la temporada (hasta mediados de noviembre), para determinar el volumen de deshielo faltante. En los años analizados, los errores analizados no fueron mayores al 10%. Esto representa en si un método de pronóstico que permitiría, por ejemplo, la actualización de los pronósticos que se efectúan con anterioridad. Con una serie estadística de imágenes para un mayor número de años, se podrían hacer recomendaciones más concluyentes.

Sin embargo, es conveniente disponer de una relación entre las dos variables que sea válida para cualquier período y, en lo posible, para subcuencas pertenecientes a la misma cuenca o a cuencas vecinas similares. Con este objeto se ha verificado en otros lugares la permanencia temporal de la relación, con las variables adimensionalizadas (Leaf, 1969):

$$x = \frac{\text{cobertura de nieve}}{\text{área de la cuenca}} \times 100 \quad \frac{km^2}{km^2}$$

$$y = \frac{\text{Vol.total - Vol. a la fecha}}{\text{Volumen total}} \times 100 \quad \frac{M\ m^3}{M\ m^3}$$

En la figura 4 se grafica el porcentaje de cobertura (x) en abcisas y el porcentaje de volumen subsequente (y) en ordenadas, correspondientes a las fechas de los períodos estudiados y de las dos subcuencas.

El análisis gráfico permite las siguientes conclusiones:

- En un mismo período, el comportamiento de cuencas vecinas de distinto tamaño es similar; se podría extrapolar el comportamiento de una cuenca a otra. Esta validez regional de las curvas debe estar relacionada con la existencia de curvas hipsométricas relativamente parecidas en las distintas subcuencas y de patrones pluviométricos similares.

- En años hidrológicos similares (1977-78, 1978-79, años húmedos) los valores se ajustan a una regresión lineal común, con un alto coeficiente de correlación. El hecho de que la relación resulte una recta, debe considerarse como una característica especial de la zona, ya que ello no se verifica en otras regiones del mundo.

- En un año seco (1975-76), los valores también se ajustan a una regresión lineal, con excepción de datos tomados al final de la temporada, influenciados por el caudal base y la fusión de los glaciares, aportes que son relativamente importantes en este tipo de años.

- Se podría encontrar relaciones válidas para cualquier año, teniendo como parámetro el tipo de año o eliminando la distorsión introducida en años secos por el caudal base y el aporte de glaciares.

- El paralelismo observado entre las dos rectas de ajuste (igual pendiente), con valores de cobertura mayores a 40%, significa que el rendimiento porcentual del retroceso (variación de cobertura), en términos de volumen porcentual, es constante e independiente de la cuenca y del tipo de año.

Las anteriores conclusiones significan que es posible encontrar una relación (lineal) entre las variables cobertura y volumen subsecuente, que sea válida en todos los años, mediante una constante de ajuste que dependa paramétricamente de alguna variable hidrometeorológica o, en forma alternativa, establecer relaciones descontando del hidrograma los aportes que no correspondan a la fusión directa de las nieves. Estas curvas permiten la previsión de caudales durante el transcurso de la temporada de deshielo, si se lleva un registro de la evolución de la cobertura de nieve y del caudal.

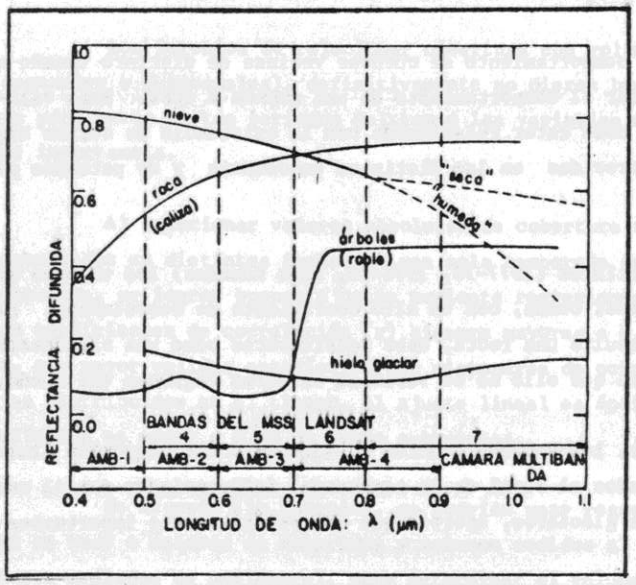

FIGURA 1.

Curvas de variación de reflectancia vs. longitud de onda, para algunos materiales típicos.

Nótese la disminución de reflectancia de la nieve en proceso de fusión, en la banda MSS-7 Landsat (0.8 - 1.1 um). Por esta razón las mediciones de cobertura en banda MSS-7 serán siempre menores a las realizadas con banda MSS-4 o MSS-5.

FIGURA 2.

Reproducción de resultados parciales de medición de cobertura por métodos digitales, según lo mostrado en la pantalla a color del sistema de procesamiento computacional de imágenes del SAF-CADI.

Cada cuadrado corresponde al elemento de imagen (80x80 metros), determinándose la superficie total de nieve mediante su contabilización directa.

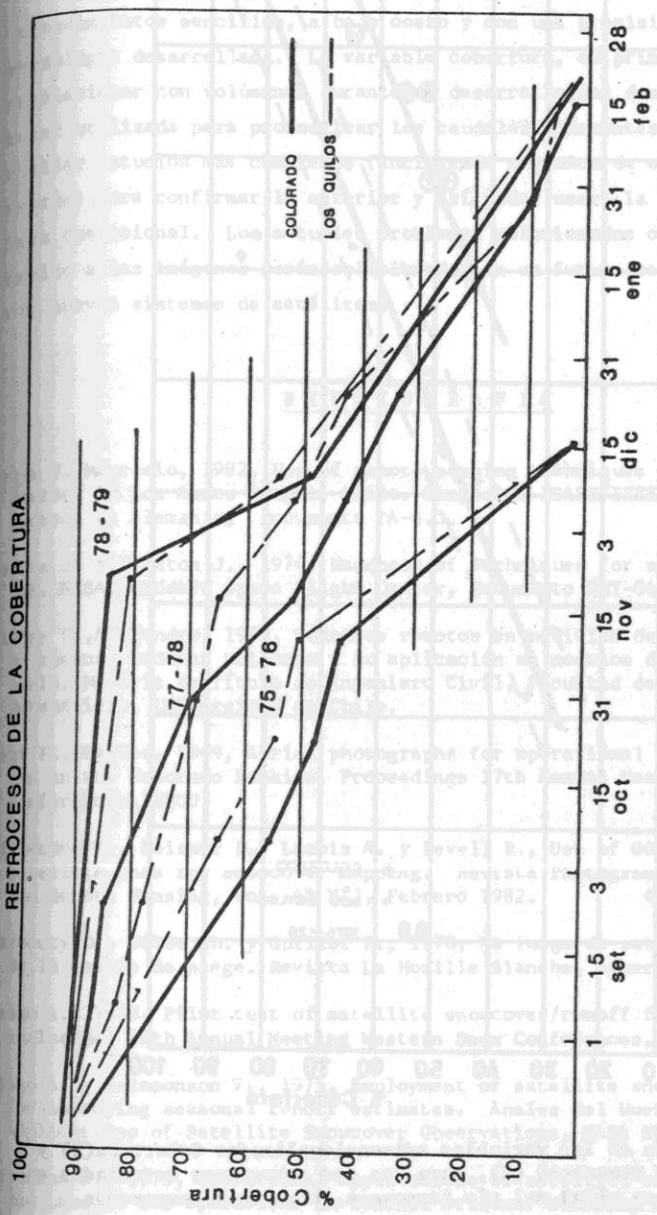

FIGURA 3. Retroceso de la cobertura de nieve (cuenca río Aconcagua).

El eje de las abcisas corresponde a los días y meses de la temporada de deshielo. En las ordenadas se ha graficado la cobertura de nieve, calculada como porcentaje del área total de cada subcuenca.

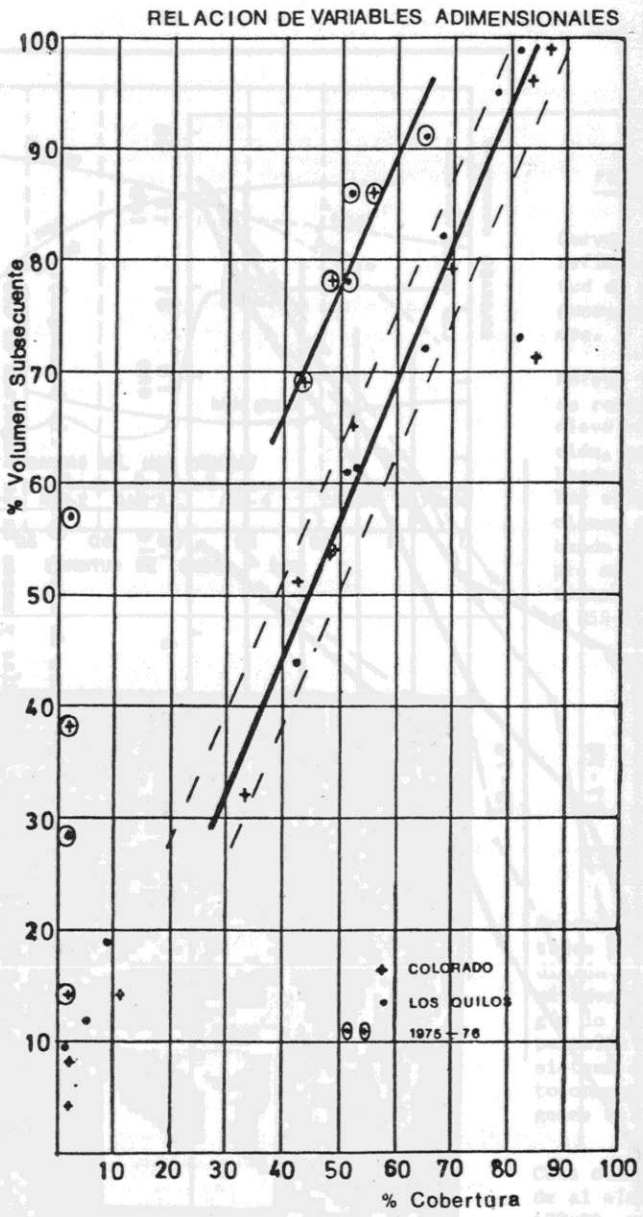

FIGURA 4. Relación de las variables adimensionalizadas Cobertura(%) y Volumen Remanente (%), para las dos subcuencas estudiadas en la cuenca nival del río Aconcagua, para tres temporadas.

5. CONCLUSIONES GENERALES

Es posible medir la variable cobertura en imágenes de satélite Landsat, con procedimientos sencillos, a bajo costo y con una precisión adecuada, mediante la metodología desarrollada. La variable cobertura, en primera instancia, se puede correlacionar con volúmenes durante el desarrollo del deshielo y, de ese modo, puede ser utilizada para pronosticar los caudales remanentes. Sería conveniente desarrollar estudios más completos (incluyendo más años de estadísticas y cuencas diferentes) para confirmar lo anterior y así poder usar la variable cobertura en forma operacional. Los actuales problemas relacionados con el acceso seguro y expedito a las imágenes serán solucionados en un futuro cercano, con la operación de nuevos sistemas de satélites.

B I B L I O G R A F I A

- Araya F.,Mauricio, 1982, Use of remote sensing techniques to study water resources in Los Andes Ranges, Chile. Simposium IGARS/IEEE, Munich, República Federal de Alemania, Documento TA-8.3.

- Barnes J. y Clinton J., 1974, Handbook of techniques for satellite snow mapping. U.S. NASA, Goddard Space Flight Center, Documento ERT-0407 A.

- Farías O.,Alejandro, 1983, Sensores remotos en medición de cobertura de nieve en cuencas andinas chilenas y su aplicación en modelos de pronóstico de deshielo. Memoria de Título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

- Leaf F.,Charles, 1969, Aerial photographs for operational streamflow forecasting in the Colorado Rockies. Proceedings 37th Annual Meeting Western Snow Conferences, EEUU.

- Lillesand T., Meisner D., Lamois A. y Devell R., Use of GOES and TIROS/NOAA satellite data for snowcover mapping. Revista Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 48 N°2, Febrero 1982.

- Marbouty D., Obled Ch. y Guillot P., 1978, La image de satellite et les mesures de la couche de niege. Revista La Houille Blanche, número especial 7-8, Francia.

- Rango A., 1978, Pilot test of satellite snowcover/runoff forecasting systems. Anales del 46th Annual Meeting Western Snow Conferences, Oregon, EEUU.

- Rango A. y Solomonson V., 1975, Employment of satellite snowcover observations for improving seasonal runoff estimates. Anales del Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, NASA SP-391, EEUU.

- Schumann H., 1975, Operational applications of satellite snowcover observations and Landsat DCS operations in Central Arizona. Workshop NASA SP-391, EEUU.