



ESTIMACIÓN DE LA CUBIERTA DE NIEVE EN EL NORTE DE LA PROVINCIA DEL NEUQUÉN

*Marisa Gloria Cogliati*¹
*Damián Groch*²
*Florencia Finessi*³

(Manuscrito recibido el 13 de julio de 2013, en su versión final 19 de octubre de 2013)

Resumen

La cobertura de nieve y hielo en zonas de cordillera representa una información importante para la utilización en hidrología, que puede ser estimada a partir de observaciones de sensores remotos. Determinar la cobertura de nieve es particularmente importante durante primavera y verano en terreno montañoso, en el cual la nieve puede derretirse rápidamente provocando grandes variaciones espaciales en la cubierta mixta de nieve, vegetación y suelo.

En este trabajo se presentó la utilización de un Método Binario para el cálculo del área cubierta de nieve de la cordillera de los Andes, en la zona norte de la provincia del Neuquén para imágenes satelitales ópticas del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) del satélite TERRA en una escena estival y otra invernal del año 2000. Para la validación de los resultados se realizó un estudio similar a partir de imágenes simultáneas del sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) a bordo del satélite LANDSAT 7, con mayor resolución espacial. Las subescenas fueron elegidas seleccionando imágenes libres de nubosidad. La validación de estos métodos se encuentra en continuo desarrollo, si bien la utilización de imágenes LANDSAT es una fuente imperfecta de validación ya que aunque mejora los resultados obtenidos por el sensor MODIS brindando información con 30 m de resolución espacial algunos píxeles pueden presentar contribuciones mixtas.

Para las distintas escenas, se calculó el área cubierta de nieve en la zona de los productos MOD10A1 y en las imágenes LANDSAT utilizadas como referencia.

En el caso de las imágenes LANDSAT se determinó el NDSI, el NDVI y la temperatura de superficie y se asociaron a cobertura nívica valores de NDSI menores

¹ Facultad de Humanidades, Departamento de Geografía, Universidad Nacional del Comahue. Av. Argentina 1400 - C.P. 8300. Neuquén, Argentina. E-mail: marisacogliati@gmail.com

² damiangroch@gmail.com

³ florencia.finessi@gmail.com

a 0.4 y valores de NDVI mayores a 0.1 que poseyeran simultáneamente una temperatura de superficie menor a 277 K.

Se obtuvo el mapeo de nieve en dos escenas seleccionadas en distintos meses, que incluyen la zona norte de la provincia del Neuquén, en una escena de invierno y otra en época de deshielo, a partir de la información de los dos sensores. Los resultados indican diferencias en la estimación del área nevada relacionada a la escala de obtención de la información.

Palabras Claves: nieve, satélite, NDSI, LANDSAT, MOD10A1.

SNOW COVER ESTIMATION IN THE NORTHERN AREA OF NEUQUÉN PROVINCE

Abstract

The snow and ice cover analysis in mountainous terrain is an important information for hydrology, and can be obtained from remote sensors. Determining snow area is particularly important during spring and summer in mountainous land where, snow can be melted quickly causing large spatial variations in the mixed cover of snow, vegetation and soil.

This paper present the utilization of a binary method for the calculation of the snow covered area in the Andes, in the northern of the Neuquén province using LANDSAT imagery and MOD10A1 MODIS products for two satellite scenes one summer scene and a winter one both from year 2000. The LANDSAT scene was used as validation because of its greater spatial resolution. The subscenes were chosen selecting images free of cloudiness. The validation of these methods is in continuous development, though the utilization of LANDSAT images is an imperfect source of validation this improves the results of MODIS sensor offering information with 30 m of spatial resolution. In LANDSAT imagery the snow covered area was calculated with NDSI less than 0.4 values and NDVI values above 0.1 simultaneously with surface temperature below 277 K.

Snow cover maps were obtained for both scenes for different months, including Wind Chain the northern of Neuquén province, one scene in august (winter) and the other in spring time. The results indicate differences in the estimation of the snowfall area related to season and the spatial resolution of data.

Key Works: snow, satellite, NDSI; LANDSAT, MOD10A1

Introducción

La cobertura de nieve y hielo en zonas de cordillera representa una información importante para la utilización en hidrología, que puede ser estimado a partir de observaciones de sensores remotos. Determinar la cobertura de nieve es particularmente importante durante primavera y verano en terreno montañoso en el cual, la nieve puede derretirse rápidamente provocando grandes variaciones espaciales en la cubierta mixta de nieve, vegetación y suelo.

La zona norte de la Provincia del Neuquén presenta una configuración compleja del terreno, con grandes áreas montañosas, generando una importante variabilidad espacial de las condiciones meteorológicas y climáticas. El relevamiento de la cobertura de nieve en estas zonas es necesario para conocer la variabilidad estacional, y dado que para la instalación de estaciones de superficie el acceso al área es muy dificultoso, es posible realizar el relevamiento a través de la información proporcionada por los sensores remotos.

En este trabajo se presentó la utilización de un Método Binario para el cálculo del área cubierta de nieve de la cordillera de los Andes, en la zona norte de la provincia del Neuquén para dos escenas obtenidas en el año 2000. Se utilizaron imágenes satelitales ópticas del sensor MODIS del satélite TERRA, lanzado el 18 de diciembre de 1999, como parte del programa EOS (Earth Observatory Station) de la NASA. Los datos de las imágenes ópticas del sensor MODIS así como los productos estándar de cobertura nival (MOD10A1), están disponibles desde el año 2000.

La validación de los resultados se realizó a partir de imágenes simultáneas del sensor ETM+ a bordo del satélite LANDSAT 7, con mayor resolución espacial. Las subescenas fueron elegidas seleccionando imágenes libres de nubosidad. El perfeccionamiento de estos métodos se encuentra en continuo desarrollo, y si bien la utilización de imágenes LANDSAT es una fuente imperfecta de validación ya que aún a 30 m de resolución algunos píxeles podrían incluir información de vegetación y nieve, esto mejora la información obtenida por el sensor MODIS.

Se calculó el índice NDSI (Normalized Difference Snow Index) en la zona, para la determinación del área cubierta de nieve en las imágenes LANDSAT y se obtuvo información comparable a los productos MODIS. Para la validación se cotejó además con la temperatura de superficie obtenida del satélite.

Estudios anteriores discuten ampliamente el uso de información satelital óptica en el estudio de cobertura de nieve y hielo utilizando el Método Binario (Dozier, 1989; Hall y *otros.*, 2002; Hall & Riggs, 2007; Rittger y *otros.*, 2013). Sin embargo son escasos los estudios realizados comprendiendo áreas de la Patagonia Argentina (De Angelis y *otros.*, 2007; Lopez y *otros.*, 2008).

Dozier (1989) desarrolló originalmente el NDSI para imágenes LANDSAT, cuyo método comenzó a ser aplicado desde el 2000 con las imágenes TERRA y desde el 2002 con las AQUA (Rittger y *otros.*, 2013).

Hall y *otros.* (2001; 2002) describieron los algoritmos utilizados para el mapeo de cubierta nival, a partir de los productos de nieve MODIS (Riggs y *otros.*, 2006).

Rittger y *otros.* (2013) realizaron una evaluación de tres métodos de estimación de la cubierta de nieve en imágenes MODIS (Binario, Fraccional y MODSCAG) con el fin de comprobar el grado de precisión de los mismos, utilizando en todos los casos imágenes LANDSAT para su validación.

En el presente trabajo, se realizó el mapeo de nieve en dos escenas que incluyen la zona norte de la provincia del Neuquén seleccionadas en distintos meses, uno con cobertura mínima y otro con cobertura máxima de nieve (invierno y primavera), a partir de la información de los dos sensores. Los resultados preliminares indican diferencias entre el área estimada por el producto MODIS y el LANDSAT, lo que se debería a la diferente resolución espacial.

Datos y Área de estudio

El área de estudio se encuentra comprendida entre los $36^{\circ}47' S$ y $37^{\circ}17' S$, y entre los $70^{\circ}39' W$ y $70^{\circ}23' W$ (ver Figura 1).

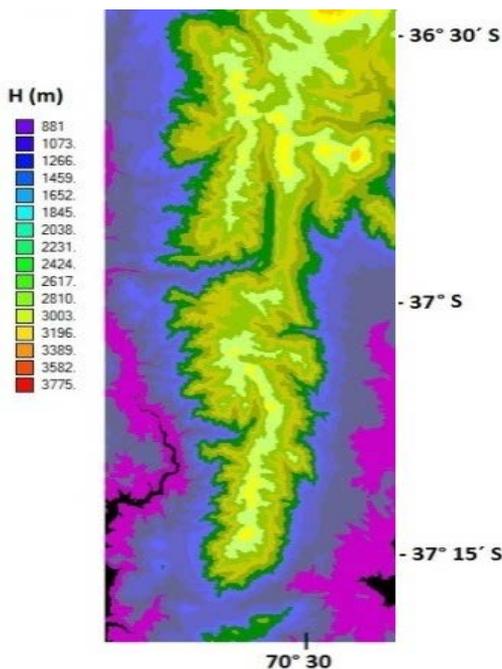


Figura 1: Ubicación y altura sobre el nivel del mar (msnm) del área en estudio. Fuente: obtenido del USGS (United States Geological Survey).

La zona incluyó un sector de la Cordillera del Viento en el norte de la provincia del Neuquén. El área comprende alturas de 1014 m hasta 3143 m s.n.m. En la Figura 1, se presenta la ubicación relativa del área de estudio, las curvas de nivel generadas a partir del modelo de elevación digital del terreno (SRTM, USGS).

En este trabajo se utilizaron dos imágenes LANDSAT 7 ETM+ y de productos diarios de nieve TERRA-MODIS (MOD10A1), adquiridas en las fechas que se presentan en la Tabla 1.

Los productos diarios de cobertura de nieve TERRA-MODIS fueron realizados a partir de imágenes del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) del satélite TERRA (EOS AM-1). Se obtuvieron del centro de archivos

del NSIDC (National Snow and Ice Data Center), disponibles en línea en el sitio web de EOSDIS⁴ (Earth Observing System Data and Information System) perteneciente a la NASA (National Aeronautics and Space Administration).

Estos productos contienen cuatro sub-productos, de los cuales se utilizó el denominado “Snow Cover”. Los mismos poseen una corrección radiométrica y geométrica de los datos del terreno “Level 3” (L3), una resolución espacial de 500 metros, con una proyección original sinusoidal, pertenecientes a la Colección 5 (V.5).

Datos	Fecha	Ubicación	UTC	Proceso
LANDSAT 7 ETM+	31/08/00	Path 232/ Row 086	14:19	L1T
MOD10A1	31/08/00	h-12/ v-12	14:55	L3
LANDSAT 7 ETM+	19/11/00	Path 232/ Row 086	14:19	L1T
MOD10A1	19/11/00	h-12/ v-12	14:55	L3

Tabla 1: Fecha y tipo de análisis de las imágenes LANDSAT 7 ETM+ y TERRA-MODIS (MOD10A1) utilizadas en el análisis. Fuente: elaboración propia en base a imágenes satelitales.

Las imágenes LANDSAT, fueron captadas por el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) a bordo del satélite LANDSAT 7, y se obtuvieron del USGS, (United States Geological Survey)⁵. Las imágenes poseen 7 bandas con una resolución espacial de 30 metros y una banda térmica con una resolución de 60 metros. Las mismas son previamente corregidas incluyendo una corrección radiométrica, una geométrica sistemática y una corrección de precisión a través de puntos de control en superficie y un modelo de elevación digital para corregir el paralaje debido a la topografía (L1T)⁶.

Para conocer la distribución espacial de la cobertura nival en función de sus rasgos de altitud, exposición y pendiente, se elaboró un mapa del área de estudio con sus distintas variables topográficas a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM) (Shuttle Radar Topographic Mission 1 (SRTM-1)). Los datos poseen una resolución espacial de 30 x 30 m.

⁴ <http://reverb.echo.nasa.gov/>

⁵ <http://earthexplorer.usgs.gov/>

⁶ Level 1 terrain corrected data.

Metodología

El método Binario utilizado implica el cálculo del índice NDSI (Normalized Difference Snow Index) desarrollado para imágenes LANDSAT (Dozier, 1989), que fue posteriormente adaptado para la generación del producto MOD10A1 del satélite TERRA, disponible a partir del año 2000 (Rittger y otros. 2013). El índice (NDSI) discrimina píxeles con y sin nieve, y está diseñado para indicar nieve cuando la cobertura de nieve del píxel de 500 metros excede ~50% (Hall y otros., 2002).

La estimación del área cubierta de nieve generada a partir de los productos TERRA-MODIS utiliza imágenes LANDSAT 7 ETM+ como fuente de validación. Dichas imágenes son trabajadas mediante una metodología que tiene en cuenta los índices NDSI, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), y la temperatura de superficie.

Producto MOD10A1

Los productos diarios de nieve TERRA-MODIS (MOD10A1) obtenidos de la NSIDC, son adquiridos originalmente con una proyección sinusoidal y una corrección Level 3. El subproducto “Snow Cover” fue inferido a partir del NDSI, NDVI y la temperatura de superficie, empleando las bandas presentadas en la Tabla 2.

Banda	Longitud de onda (μm)	Utilidad
1	0,62 - 0,67	NDVI
2	0,841 - 0,876	
4	0,545 - 0,565	NDSI
6	1,628 - 1,672	
31	10,780 - 11,280	Máscara Termal
32	11,770 - 12,270	

Tabla 2: Bandas MODIS utilizadas para la obtención del subproducto “Snow Cover”. Fuente: Hall & Riggs, 2007.

A los subproductos se le aplicó una corrección geométrica, re proyectando la grilla sinusoidal a coordenadas geográficas, con un datum WSG-84. Utilizando el sistema de información geográfico ENVI, se realizó una máscara para seleccionar los píxeles presencia de nieve en las dos fechas consideradas.

Imágenes LANDSAT 7 ETM+

La determinación de la cubierta nieve con el Método Binario en las escenas LANDSAT 7 ETM+ se realizó a través de tres pasos, estableciendo diferentes filtros para evitar la clasificación errónea de píxeles mixtos. Para obtener datos comparables con los productos MOD10A1, se calculó el NDSI y se seleccionaron valores de NDSI mayores a 0.4 y los valores que presentaran NDVI mayor a 0.1 con una temperatura de superficie menor a 277K. La Tabla 3 presenta las bandas utilizadas en la realización del mapa de área cubierta de nieve con información LANDSAT.

Banda	Longitud de onda (μm)	Utilidad
2	0,525 - 0,605	NDSI
3	0,630 - 0,690	NDVI
4	0,760 - 0,900	
5	1,550 - 1,750	NDSI
6	10,40 - 12,500	Tsup.

Tabla 3: Bandas LANDSAT 7 ETM+ utilizadas para generar el mapa de cubierta de nieve. Fuente: Lopez y otros., 2008.

Para la estimación del NDSI, se calculó la reflectancia al tope de la atmósfera según (1):

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

Donde L_{λ} es la radiancia espectral en el satélite, d es la distancia la sol, $ESUN_{\lambda}$ es la irradiancia exoatmosférica para cada banda λ (para LANDSAT 7, Banda 1:1969 W/m²/μm, banda 2: 1840W/m²/μm) (LANDSAT Project Science Office, 2002) y el $\cos \theta$ es el coseno del ángulo solar incidente.

La radiancia espectral en el satélite se obtuvo mediante la ecuación (2):

$$L_s = L_{\min} + \left(\frac{D_n}{D_{n \max}} * (L_{\max} - L_{\min}) \right) \quad (2)$$

Siendo L_s la radiancia espectral en la banda térmica (W/(m² ster μm)) (LANDSAT Project Science Office, 2002), $L_{\max} = 17.040$, $L_{\min} = 0.00$ (obtenidos del archivo de cabecera de las imágenes; banda 6), D_n y $D_{n \max}$ son los niveles digitales y nivel digital máximo de cada escena.

Los valores de reflectancia en superficie de las bandas 2 y 5, fueron obtenidos mediante la utilización de parámetros de compensación atmosféricos, a partir de la información contenida en la escena. La corrección al nivel de superficie se realizó mediante el algoritmo QUAC (QUick Atmospheric Correction, Module ITT Visual Information Solutions) disponible en el sistema de información geográfica ENVI 5.0. El método busca empíricamente la reflectancia promedio para materiales con distintos espectros, y es un método independiente de la escena.

El NDSI se obtuvo según (3):

$$NDSI = \frac{(\rho_2 - \rho_5)}{(\rho_2 + \rho_5)} \quad (3)$$

Para comparar la determinación de los píxeles clasificados como nieve, a través del NDSI, se aplicaron las mismas consideraciones que en el caso de los productos MODIS basados en NDVI y temperatura de superficie.

La radiancia corregida se calculó utilizando el modelo MODTRAN disponible online (Barsi y *otros.*, 2005). permite convertir la radiancia medida por el satélite en el espacio a la radiancia que es emitida en la superficie según la inversión directa de la Ecuación de transferencia radiativa (4):

$$LTOA = \tau \epsilon LT + L_u + \tau (1 - \epsilon) L_d \quad (4)$$

En la cual τ es la transmisividad atmosférica; ϵ es la emisividad de la superficie; LT ($W/m^2/sr/\mu m$) es la radiancia de cuerpo negro del emisor a una temperatura (de superficie) (K), L_u ($W/m^2/sr/\mu m$) es la radiancia atmosférica ascendente, L_d ($W/m^2/sr/\mu m$) es la radiancia atmosférica descendente y $LTOA$ ($W/m^2/sr/\mu m$) es la radiancia que llega al espacio y es medida por el instrumento.

Los valores de transmitancia atmosférica y radiancia entrante (hacia abajo) y saliente (hacia arriba), obtenidos del modelo MODTRAN (Barsi y *otros.*, 2005), son detallados en la Tabla 4.

Fecha	τ	L_u	L_d
31/08/2000	0.97	0.13	0.23
07/02/2001	0.91	0.63	1.06

Tabla 4: Transmisividad atmosférica (τ), L_u y L_d ($W/m^2/sr/\mu m$) para las escenas seleccionadas. Fuente: MODTRAN

El NDVI (Sobrino y *otros.*, 2001) se calculó partir de los valores obtenidos en las ecuaciones (1) y (2), con la reflectancia de las bandas 3 y 4 corregidas utilizando el algoritmo QUAC, disponible en ENVI, según ecuación (5):

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3)} \quad (5)$$

La Temperatura de Superficie, se obtuvo utilizando la función de Planck monocromática (6):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln(K_1/L_s + 1)} \quad (6)$$

Donde T_s es la temperatura de superficie (K), K_1 y K_2 son constantes de calibración de pre-lanzamiento (para Landsat 7 ETM+, $K_1 = 666.09 W/(m^2 sr mm)$ y $K_2 = 1282.71 K$ (LANDSAT Project Science Office, 2002), y L_s es la radiancia en esa longitud de onda obtenido en el punto 6 (radiancia corregida).

Para la obtención del área cubierta de nieve se planteó un NDSI mayor a 0.4 y valores de áreas donde los valores de NDVI fueran mayores a 0.1 con temperatura de superficie menor a 277 K.

Estas suposiciones se basan en que el NDVI, permite distinguir áreas forestales con cobertura de nieve aun cuando los valores del NDSI son inferiores a 0.4 y el NDVI es mayor a 0.1 (Hall y *otros.*, 2002) y la temperatura de superficie excluye a los píxeles clasificados como “nieve” pero con una temperatura mayor a 277 K (Hall y *otros.*, 2002). Sin embargo, hay autores que incrementan el valor de la temperatura a 280 ó 283 K como lo son Romanov y *otros.* (2000) y López y *otros.* (2008). Estos límites serán analizados en trabajos posteriores.

La nieve posee fuerte reflectancia en el visible y fuerte absorción en el infrarrojo entre 1.4 μm y 3.0 μm . El índice NDSI es una manera efectiva para distinguir la nieve de muchas otras características de la superficie tanto en condiciones de luz o de sombra (Hall y *otros.*, 2001).

El mapa final de cubierta de nieve para las imágenes LANDSAT, se realizó asignando el valor 200 a lo que se correspondería con nieve y 0 al resto de los píxeles con otro tipo de información y se realizó la comparación cuantitativa entre las imágenes y los subproductos.

Las estimaciones realizadas a partir del subproducto MOD10A1, las escenas LANDSAT y los correspondientes filtros, permitieron la realización de diversos mapas de cobertura nívica.

Discusión y Resultados

La Figura 2 presenta las áreas cubiertas de nieve estimadas a partir del procedimiento detallado en la sección anterior para las imágenes LANDSAT (izquierda) y los productos MOD01A1 (derecha), se puede observar la correspondencia espacial de las áreas y las diferencias, principalmente en el segundo caso.

La Tabla 5 muestra la superficie cubierta de nieve total obtenida para cada una de las escenas analizadas. En la Figura 2 se observa claramente las variaciones estacionales. En la escena coincidente con la temporada invernal el mapa de cubierta nívica del producto comparada con la escena LANDSAT subestimó parte del área, mientras que en primavera se detectó una sobreestimación. En la escena del 31 de agosto de 2000 el análisis de la imagen LANDSAT detectó un área de 741.5 km², mientras que el producto MOD10A1 detectó 687,2 km², y en noviembre el análisis de la imagen LANDSAT detectó 52.1 km², y el MOD10A1 80.54 km². Las mayores diferencias se presentaron cuando el área cubierta es menor, consistente con el hecho de que la resolución espacial de 500 m de MODIS, no puede detectar pequeñas áreas de cobertura nívica.

Datos satelitales	Fecha	Superficie cubierta de nieve (km ²)
Landsat 7 ETM+	31/08/2000	741.5280
MOD10A1	31/08/2000	687.2193
Landsat 7 ETM+	19/11/2000	52.1199
MOD10A1	19/11/2000	80.5491

Tabla 5: Superficie cubierta de nieve estimada a partir de las imágenes satelitales. Fuente: elaboración propia en base a imágenes satelitales.

Estas diferencias se generarían debido a la baja resolución espacial de producto MOD10A1, ya que se observan de pixeles clasificados como nieve en las imágenes LANDSAT que no se detectan en los productos.

La superficie calculada en el caso el producto MOD10A1 para la época estival es superior a la calculada en el caso de LANDSAT. Esto se debería no sólo a la diferencia en la resolución espacial, sino también a los errores de incorporación de superficie boscosa densa.

Conclusiones

Los productos MOD10A1 fueron validados utilizando imágenes LANDSAT 7 ETM+. Los resultados de la aplicación de diversos filtros para la obtención de mapas de cubierta de nieve determinaron que en agosto, el mes invernal, los productos MOD10A1 presentaron una subestimación del 7,32% con respecto a la obtenida con el satélite LANDSAT. Sin embargo, en el mes de noviembre, durante la primavera, se produjo el efecto contrario al sobreestimarse la superficie cubierta de nieve en un 35,29%. Se propone continuar con el análisis de los límites de temperatura asociados a la detección de nieve utilizando el NDVI y la incorporación de mayor cantidad de escenas, que permitan analizar más ampliamente estas variaciones. Se incorporará además el análisis de sombras que podrían afectar los resultados y la incorporación de clasificación supervisada en las áreas donde se detectaron las diferencias más notorias. Las mayores diferencias se presentan cuando el área cubierta es menor, consistente con el hecho de que la resolución espacial de 500 m de MODIS, no puede detectar pequeñas áreas de cobertura nívea..

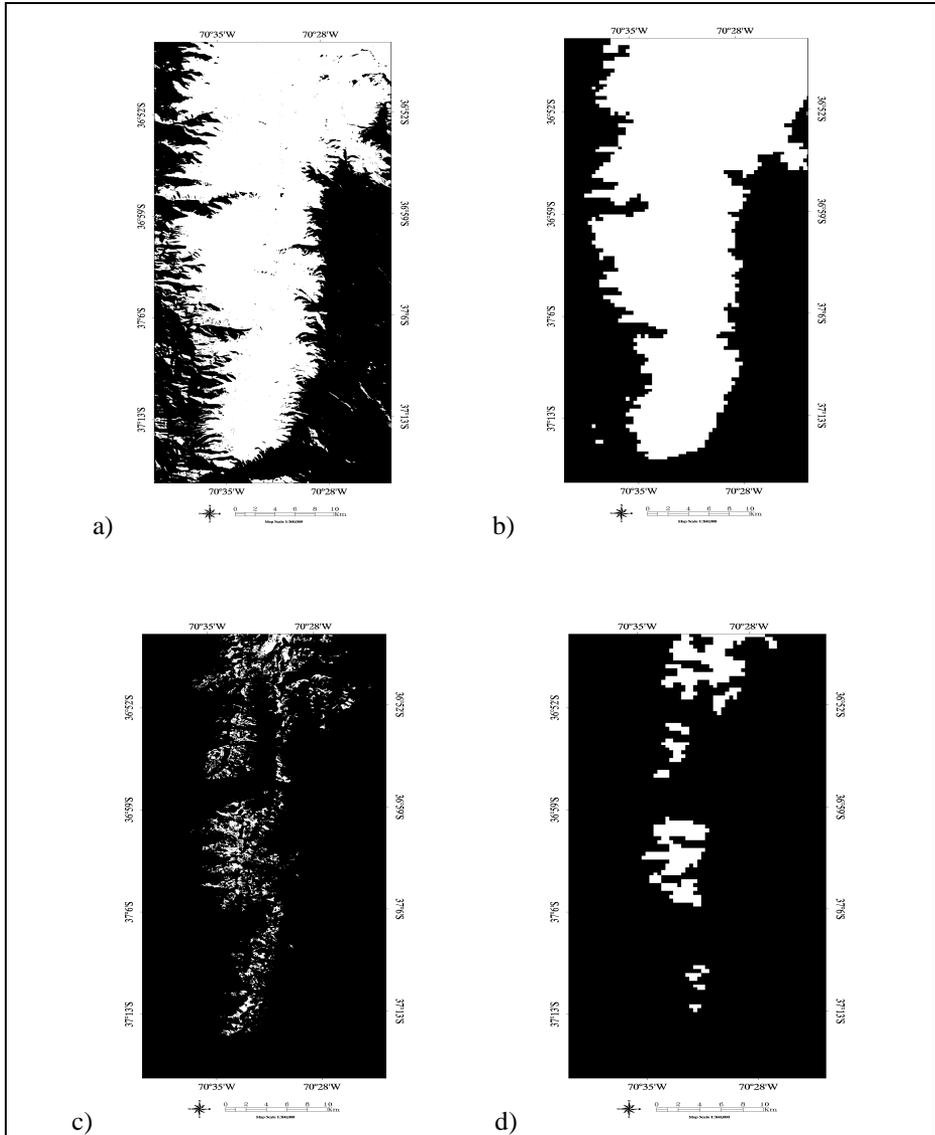


Figura 2: Área cubierta de nieve obtenida del LANDSAT 7 ETM+ (a) y (c) -izquierda- y producto MOD10A1 (b) y (d) -derecha-, para el 31/08/00 (a) y (b) -arriba- y 19/11/00 (c) y (d) -abajo-. Fuente: elaboración propia en base a imágenes satelitales.

Bibliografía

- BARSI J.A., SCHOTT J.R., PALLUCONI F.D. & HOOK S.J. (2005). "Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments". Earth Observing Systems X. Proceedings of SPIE Vol. 5882, 1-7.
- DE ANGELIS H., RAU F. & SKVARCA P. (2007). "Snow zonation on Hielo Patagónico Sur, Southern Patagonia, derived from Landsat 5 TM data". Global and Planetary Change 59, 149-158.
- DOZIER J. (1989). "Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper". Remote Sensing of Environment 28, 9-22.
- HALL D.K. & RIGGS G.A. (2007). "Accuracy assessment of the MODIS snow products". Hydrological Processes 21, 1534-1547.
- HALL D.K., RIGGS G.A. & SALOMONSON V.V. (2001). "Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms".
- HALL D.K., RIGGS G.A., SALOMONSON V.V., DIGIROLAMO N.E. & BAYR K.J. (2002). "MODIS snow-cover products". Remote Sensing of Environment 83, 181-194.
- LANDSAT Project Science Office (2002). "Landsat 7 Science Data User's Handbook". NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD. 1-186. http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf
- LOPEZ P., SIRGUEY P., ARNAUD Y., POUYAUD B. & CHEVALLIER P. (2008). "Snow cover monitoring in the Northern Patagonia Icefield using MODIS satellite images (2000-2006)". Global and Planetary Change 61, 103-116.
- RIGGS G.A., HALL D.K. & SALOMONSON V.V. (2006). "MODIS Snow Products User Guide to Collection 5". The MODIS Snow & Sea Ice Global Mapping Project. NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD. 1-80. http://modis-snowce.gsfc.nasa.gov/uploads/sug_c5.pdf.
- RITTGER K., PAINTER T.H. & DOZIER J. (2013). "Assessment of methods for mapping snow cover from MODIS". Advances in Water Resources 51, 367-380.
- ROMANOV P., GUTMAN G. & CSISZAR I. (2000). "Automated Monitoring of Snow Cover over North America with Multispectral Satellite Data". American Meteorological Society. Journal of Applied Meteorology Vol. 39, 1866-1880.
- SOBRINO J.A., RAISSOUNI N. & LI Z. (2001). "A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data". Remote Sensing of Environment 75, 256-266.