

ANÁLISIS DE LA COBERTURA NIVAL DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO MENDOZA A PARTIR DE IMÁGENES MODIS

Leandro Cara, Mariano Masiokas, Maximiliano Viale, Ricardo Villalba

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología Y Ciencias Ambientales, CONICET. Mendoza. Argentina.

(Manuscrito recibido el 13 de agosto de 2015, en su versión final el 20 de octubre de 2015)

RESUMEN

El deshielo de la nieve acumulada durante el invierno en la cuenca alta del río Mendoza constituye el principal suministro de agua para la agricultura, la industria y el consumo humano en los sectores bajos adyacentes. Sin embargo, a pesar de su gran importancia, hay muy pocos estudios que permitan conocer y entender la variabilidad espacial y temporal de la nieve en este sector de los Andes Centrales de Argentina. En este trabajo presentamos una técnica para cuantificar la evolución diaria de la cobertura nival en esta cuenca basada en la integración de imágenes de los sensores MODIS Aqua y Terra para el período 2000 y 2014. La técnica muestra disminución en la pérdida de información por presencia de nubosidad y fue realizada utilizando herramientas y funciones de los lenguajes de programación Libres R y BASH. Las series de cobertura de nieve obtenidas muestran importantes variaciones estacionales con aumentos de la cobertura nival en invierno (58 % de cobertura máxima en promedio) y reducciones significativas en verano. Asimismo, se observa una importante variabilidad interanual con claras diferencias entre años secos (ej. 2010, con 12 % de cobertura promedio) y nevadores (ej. 2005, 32 % de cobertura anual promedio). Los mapas de cobertura nival muestran además que los sectores con mayor persistencia de nieve coinciden con la ubicación de glaciares, en los sectores más elevados, protegidos y de menor insolación de la cuenca. Los resultados brindan información novedosa y relevante para conocer y entender de forma más completa la distribución y variabilidad de la cobertura nival en este sector de la cordillera. Los mismos pueden servir de base para múltiples aplicaciones incluyendo el modelado hidrológico de la cuenca del río Mendoza contribuyendo al manejo racional de sus recursos hídricos.

Palabras clave: MODIS Snow Cover Area, evolución cobertura nival, Cuenca del Río Mendoza

SNOW COVER ANALYSIS IN THE UPPER MENDOZA RIVER BASIN, USING MODIS

ABSTRACT

The melting of snow accumulated in the upper Mendoza river during winter is the main water supply for agriculture, industry and human consumption in the area. Despite its importance, there are few studies that have assessed the spatial and temporal variability of snow in this sector of the Central Andes of Argentina.

We present a technique to quantify the daily evolution of the snow cover in the basin based on the integration of scenes from Aqua and Terra MODIS sensors acquired between 2000 and 2014. This technique improves the amount of snow cover information by minimizing the impact of clouds on different sectors of the scenes, and was developed using the free programming languages R and BASH. The snow cover series obtained show significant seasonal variations with increases in winter (58 % avg. coverage) and significant reductions in summer. Also, a significant inter-annual variability is observed with clear differences between dry years (e.g. 2010, with 12 % average) and snowy winters (eg. 2005, 32 % average). Snow cover maps also show that the sectors with greatest persistence of snow correspond with the location of glaciers in the highest, more protected and less illuminated areas in the basin. The results provide new and important information to better understand the distribution and variability of snow cover in this sector of the Andes. They can serve as the basis for multiple applications including the hydrological modeling of the Mendoza river, contributing to improve the management of the water resources.

Keywords: MODIS Snow Cover Area, snow cover depletion, Mendoza River basin.

1. INTRODUCCIÓN

El agua proveniente del deshielo de la nieve acumulada durante el invierno en los Andes Centrales de Argentina constituye un suministro fundamental para las actividades agrícolas, industriales y humanas que se desarrollan en vastas regiones del centro oeste del país (Cea López et al. 2005; Masiokas et al. 2006). Sin embargo, a pesar de la gran importancia socio-económica que reviste el sistema hidro-climático andino en esta región, hay muy pocos estudios y mediciones detalladas sobre la variabilidad estacional e interanual de los caudales y de las principales variables climáticas en cordillera (Masiokas et al. 2006). Por ejemplo, el monitoreo de acumulación de nieve en la cuenca alta del río Mendoza, principal fuente de agua para el principal aglomerado humano e industrial de la provincia, se basa en dos estaciones nivo-meteorológicas (Toscas y Horcones) mantenidas por el Departamento General de Irrigación. Estas estaciones proveen datos meteorológicos de resolución diaria y de excelente calidad pero claramente no permiten caracterizar la enorme variabilidad de ambientes y condiciones existentes en este extenso sector de la Cordillera de los Andes.

La utilización de sensores remotos para la

observación de las variaciones estacionales e interanuales de la cobertura nival es actualmente una herramienta ampliamente utilizada en distintas regiones del planeta (Riggs et al. 2006; Landau 2008; Immerzeel et al. 2009; Roy et al. 2010; Bergeron et al. 2014; Salcedo & Cogliati 2014). Los sensores MODIS a bordo de los satélites Aqua y Terra son una de las herramientas más utilizadas para este fin ya que sus imágenes permiten realizar un seguimiento de la distribución de la cubierta nival de forma diaria y desarrollar mapas regionales o globales teniendo en cuenta las propiedades de la superficie de la tierra. Sin embargo, a pesar de sus virtudes, uno de los inconvenientes mayores que posee el análisis de imágenes MODIS y de otros sensores remotos que trabajan en el rango visible e infrarrojo es la pérdida de información por presencia de nubes en el área de interés (Roy et al. 2010; Bergeron et al. 2014). Esto ha llevado recientemente al desarrollo de metodologías que permitan suplir la pérdida de información por nubes, que en algunas regiones puede llegar a ser considerable (Bergeron et al. 2014).

El objetivo de este estudio consiste en analizar la evolución diaria, estacional e interanual de la cobertura nival de la cuenca alta del río Mendoza durante los 15 años de existencia de imágenes MODIS (2000-2014). Para ello,

se presenta una metodología semi-automática basada en la integración de las imágenes Terra y Aqua que minimiza la pérdida de información debida a la presencia de nubes. La metodología propuesta en el presente trabajo es novedosa y representa la primera contribución en esta temática desarrollada en base a Software Libre R y Bash. El conjunto de rutinas desarrolladas permitirá en el futuro realizar estudios similares en otros sectores con nieve estacional no sólo en los Andes, sino también en otras montañas del planeta. En el plano regional, los resultados presentados pretenden contribuir al conocimiento del ciclo hidrológico andino y proveer información para el manejo sustentable de los recursos hídricos en los Andes semiáridos de Argentina.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El sector estudiado corresponde a la parte alta de la cuenca del río Mendoza (Figura 1). Esta cuenca se ubica al noroeste de la provincia homónima y concentra la mayor población en el sector centro – oeste de Argentina, siendo la cuarta región en importancia económica a nivel nacional. Con una superficie de 8.035 km², la cuenca alta del río Mendoza provee agua para el desarrollo de la mayor parte de las actividades agrícolas, industriales y humanas que se realizan en la parte media y baja de la misma, al este de la Cordillera de los Andes (Figura 1). La extensa región que se beneficia con las aguas de este río incluye a la ciudad de Mendoza y sus alrededores, que constituyen el “Oasis Norte” de la provincia. La hidrología de la cuenca alta del río Mendoza podría caracterizarse como de carácter nivo-glacial (Bruniard 1994). Durante los meses invernales se produce la mayor cantidad de precipitaciones, la cual se acumula en forma de nieve. Al comienzo de la primavera y durante la estación cálida, la nieve acumulada se derrite aumentando el caudal del río homónimo y determinando un hidrograma unimodal con un máximo en los meses de diciembre y enero (Bruniard 1994). El aporte hídrico de los glaciares existentes en la cuenca alta del río Mendoza

(Zalazar et al. 2012) adquiere mayor importancia hacia el final del verano y sobre todo durante años “secos” o poco nevadores cuando la contribución nival disminuye considerablemente (Masiokas et al. 2006).

2.2. Información satelital

En este trabajo se utilizaron imágenes diarias de los sensores MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; Justice et al. 2002), piezas instrumentales de los satélites Terra EOS AM (lanzado en diciembre de 1999), y Aqua EOS PM (lanzado en mayo del 2002). Para este estudio se utilizaron todas las imágenes MODIS disponibles desde el lanzamiento de los satélites hasta el 31 de diciembre de 2014. La órbita del satélite Terra está programada para que cruce el Ecuador en dirección sur a la mañana pasando por el sector de estudio aproximadamente a las 15:00 UTC, mientras que el satélite Aqua se encuentra programado para que cruce el Ecuador en dirección norte en la tarde aproximadamente a las 19:00 UTC (Barnes et al, 1998; Justice et al. 2002; Riggs et al, 2006). De esta forma, ambos satélites permiten obtener información complementaria de la superficie terrestre en distintas horas del día. Los sensores MODIS a bordo de los satélites Aqua y Terra son prácticamente idénticos con una alta sensibilidad radiométrica (12 bits) en 36 bandas espectrales y un rango de longitud de onda que va de los 0.4 μm a los 14.4 μm (Qu et al. 2006). Cuentan además con una buena calidad geométrica que permite el monitoreo preciso de las alteraciones de la superficie terrestre (error RMS inferior a 50 m) (Riggs & Hall 2011; Mas 2011), y una alta resolución temporal que permite observar cualquier parte de la Tierra diariamente (Seidel & Martinec, 2004).

La detección de la cobertura nival a través de los sensores MODIS es posible gracias a la alta reflectancia de la nieve en el espectro visible y una baja reflectancia en el infrarrojo cercano. El índice más comúnmente utilizado para su reconocimiento es el Índice Normalizado de Diferencia de Nieve o “Normalized Difference

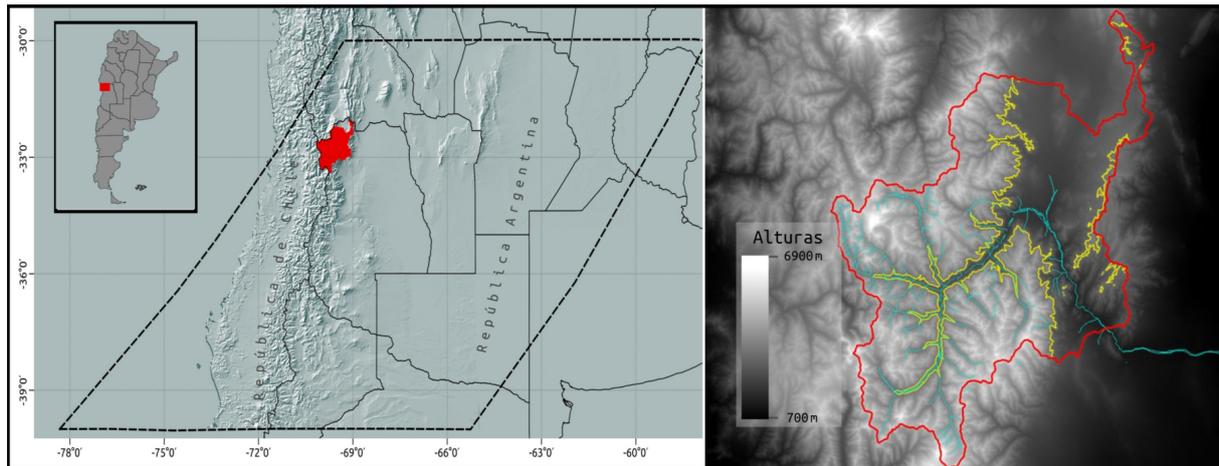


Figura 1: Izquierda: Ubicación regional de la cuenca alta del río Mendoza (en rojo) en el centro-oeste de Argentina. En líneas llenas se observan los límites provinciales y en línea punteada el área cubierta por las escenas MODIS utilizadas. Derecha: Vista ampliada de la cuenca donde se observan las fuertes diferencias de elevación y los principales sectores montañosos de la cuenca. En amarillo se marca la curva de nivel correspondiente a los 2.000 msnm

Snow Index” (NDSI, por sus siglas en inglés) que relaciona las longitudes de onda mencionadas y es normalmente calculado utilizando la reflectancia a tope de atmósfera (Riggs et al, 2006). En este trabajo se ha utilizado un producto de nivel 3 de procesamiento, el cual posee una resolución espacial de 500 x 500 m y entrega, entre otros, información del área cubierta de nieve conocida como Snow Cover Area (SCA, por sus siglas en inglés). El algoritmo básico del SCA interpreta existencia de nieve si el valor del NDSI es superior a 0.4 (Riggs & Hall 2011). El producto de nieve derivado de MODIS Terra utilizado en este trabajo corresponde al denominado MOD10A1, y el derivado de MODIS Aqua, MYD10A1. Ambos productos fueron obtenidos a través del portal Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS; <http://reverb.echo.nasa.gov/>).

Para la obtención de alturas en la cuenca de estudio, se utilizó el Modelo Digital de Elevación Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con una resolución espacial de 3 segundos de arco (aprox. 90 m; Farr et al. 2007). El SRTM es gratuito y fue desarrollado por la NASA en el Jet Propulsion Laboratory (JPL). El modelo digital de elevación fue obtenido a través del portal

web Servicio Geológico de Estados Unidos (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).

2.3. Análisis y procesamiento de datos

La herramienta MODIS Reprojection Tool (MRT) desarrollada por el U.S. Geological Survey (Dwyer & Schmidt 2006) fue inicialmente utilizada para transformar de formato HDF a TIF a cada una de las escenas disponibles, re proyectarlas de su proyección original WGS84-SIN a WGS84-UTM19S, y finalmente recortarlas al área de trabajo, es decir la cuenca alta del río Mendoza (Figura 1). En total, se trabajó con 9.870 imágenes (5.332 imágenes MOD10A1 y 4.538 imágenes MYD10A1) que permitieron desarrollar una serie temporal de cobertura diaria de nieve de la cuenca con una extensión de 15 años. Como se mencionó anteriormente, la serie MOD10A1 (sensor Terra) comienza en febrero del año 2000 mientras que la serie MYD10A1 (sensor Aqua) está disponible desde julio del año 2002.

Una vez reformateadas, re proyectadas y recortadas al área de estudio, a cada imagen MOD10A1 se le calculó el porcentaje de cobertura nival y el porcentaje de cobertura de

superficie de la cuenca fueron contabilizadas como datos faltantes en las series. La serie de imágenes MOD10A1 con información válida (<30 % de cobertura de nubes) entre los años 2000 y 2014 contiene 3247 imágenes que equivale a un 59.85 % del número total de imágenes disponibles.

Con el objetivo de obtener información de nieve para los días en que las imágenes MOD10A1 superaban el umbral de 30 % de cobertura nubosa (bastante frecuentes durante el invierno en la zona de estudio), se desarrollaron procedimientos simples basados en álgebra booleana aplicada a imágenes (Chuvieco 1995). En primer lugar, los sectores con presencia de nubes en las escenas MOD10A1 fueron reemplazados con información del mismo día pero de la serie MYD10A1. Dado que los sensores MODIS Terra y Aqua cubren el área de estudio en diferentes horarios del día, es posible que las nubes hayan desaparecido o se hayan desplazado a otra posición, reduciendo así la cobertura nubosa sobre el área de interés en la imagen (Bergeron et al. 2014). Bajo este razonamiento, mediante la combinación de información otorgada por las imágenes de ambos sensores, es posible obtener una nueva serie de escenas diarias o producto, cuyo porcentaje de cobertura nubosa es sensiblemente menor que cualquiera de los dos productos (MOD10A1 y MYD10A1) considerados en forma individual. Al producto de la combinación de los dos sensores (aquí llamado “MOD-MYD”) se le calcularon sus valores de porcentajes de cobertura diarios, como los calculados para MOD10A1. Las escenas MOD-MYD que aún mostraban una cobertura de nubes por encima del umbral de 30 % de nubosidad también fueron inicialmente excluidas y sus valores estimados a través de interpolación lineal para su visualización gráfica.

Posteriormente, y con el fin de disminuir aún más el porcentaje de imágenes excluidas por nubosidad, se desarrolló un nuevo producto donde los píxeles cubiertos por nubes en cada una de las escenas MOD-MYD fueron reemplazados por información disponible en las escenas de los días previos. Esta reconstrucción del sector

ocupado con nubes para cada una de las escenas MOD-MYD es realizado píxel a píxel, buscando en las imágenes previas para cada píxel un valor con información de cobertura. Partiendo de información válida sobre cobertura de nieve de un día sin nubes, este procedimiento permite completar toda la serie de imágenes sin necesidad de interpolar y optimizando el uso de la información de nieve disponible. El nuevo producto denominado “MOD-TAP” no contiene huecos de información de cobertura de nieve en la cuenca. Es importante aclarar que el relleno de información con días previos no tuvo restricciones en cuanto al número de días a utilizar. La mediana de la cantidad de días previos utilizados es de 10 días por año, mientras que el percentil 90 no supera los 17 días por año (ver Figura 6). El máximo absoluto de días alcanzó los 121 días, pero esto sólo correspondió a 5 píxeles adyacentes que equivalen al 0.016 % de la superficie total de la cuenca. Con este nuevo producto se calculó para cada día el porcentaje de cobertura nival en la cuenca, tal como fue calculado para los productos MOD10A1 y MOD-MYD. Además en el producto MOD-TAP se evaluó la evolución temporal de la altura mínima a la que se encuentra cobertura nival y su distribución espacial dentro de la cuenca. El proceso completo de análisis de las imágenes está resumido en la Figura 2.

Finalmente, y con el fin de evaluar la influencia de distintos umbrales de nubosidad sobre los porcentajes de información válida (cobertura de nieve) extraíble de las imágenes, también se analizó esta variable en las series completas MOD10A1 y MOD-MYD, y en dos subgrupos de imágenes correspondientes a primavera-verano (obtenidas entre el 21 de septiembre y el 20 de marzo) y a otoño-invierno (entre el 21 de marzo y el 20 de septiembre), tal como se observa en la Figura 3.

Los algoritmos creados para la obtención de los productos mencionados fueron desarrollados en el lenguaje de programación R y BASH (R-Core Team. 2014; Hijmans. 2015; Zeileis and Grothendieck 2005; Allaire et al. 2015),

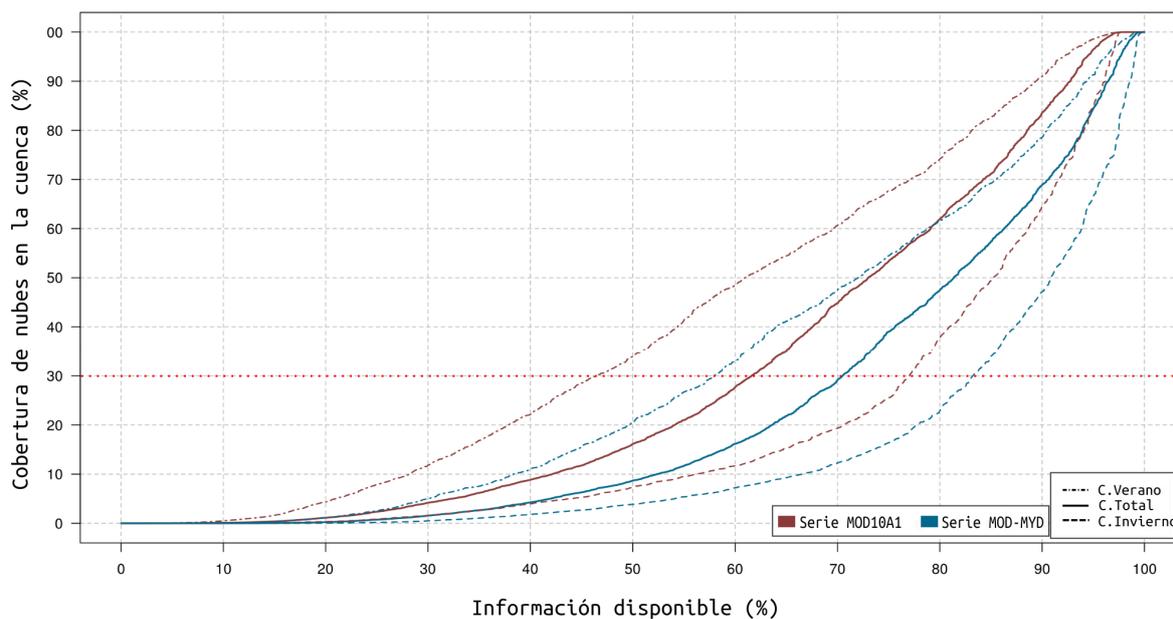


Figura 3: Frecuencia acumulada de cobertura de nubes (expresada en porcentaje de respecto al total de imágenes) en la cuenca alta del río Mendoza para las series MOD10A1 y MOD-MYD. Las líneas llenas representan las series completas, mientras que las líneas punteadas (cortadas) corresponden a los subgrupos de datos de primavera-verano (otoño-invierno). Notar la mayor disponibilidad de información en las series del producto MOD-MYD.

sistematizados y organizados para generar el procesamiento en bloque de todas las imágenes de forma semi-automatizada a través de llamado de funciones.

3. RESULTADOS

En la Figura 3 se muestra la frecuencia acumulada de nubes (expresadas en porcentaje del número total de imágenes) para diferentes umbrales de nubosidad y la frecuencia acumulada de nubes para los subgrupos de imágenes primavera-verano, y otoño-invierno (expresados en porcentaje del número de imágenes presentes en cada subgrupo). Esta fue calculada tanto para el producto MOD10A1 como para el producto combinado MOD-MYD. En primer lugar, e independientemente de los subgrupos de imágenes utilizados, en ambos productos se observa que la información o porcentaje de imágenes válidas aumentan a medida que aumenta el umbral de nubosidad. También se observa que, para un mismo umbral de

nubosidad, el producto combinado MOD-MYD provee invariablemente un mayor porcentaje de imágenes disponibles que el producto MOD10A1, confirmando la utilidad de MOD-MYD para extraer una mayor cantidad de información válida para el estudio de nieve en la cuenca. Por ejemplo, utilizando las series completas (líneas sólidas en Figura 3) y un umbral de 30% de cobertura de nubes, el producto MOD-MYD ofrece un 70,4% de información válida, mientras que el MOD10A1 ofrece un 61,6% (cerca de 8% menos) de información válida. Los subgrupos de imágenes de primavera-verano y otoño-invierno muestran diferencias importantes, con ganancias sustancialmente mayores durante las estaciones cálidas que durante las frías (ver líneas punteadas y cortadas en Figura 3).

En la Figura 4 se muestran los registros de cobertura nival (MOD10A1, MOD-MYD y MOD-TAP, suavizados con una media móvil de 31 días) y de nubes (MOD10A1 y MOD-MYD) para el periodo 2000-2014 en la cuenca alta del

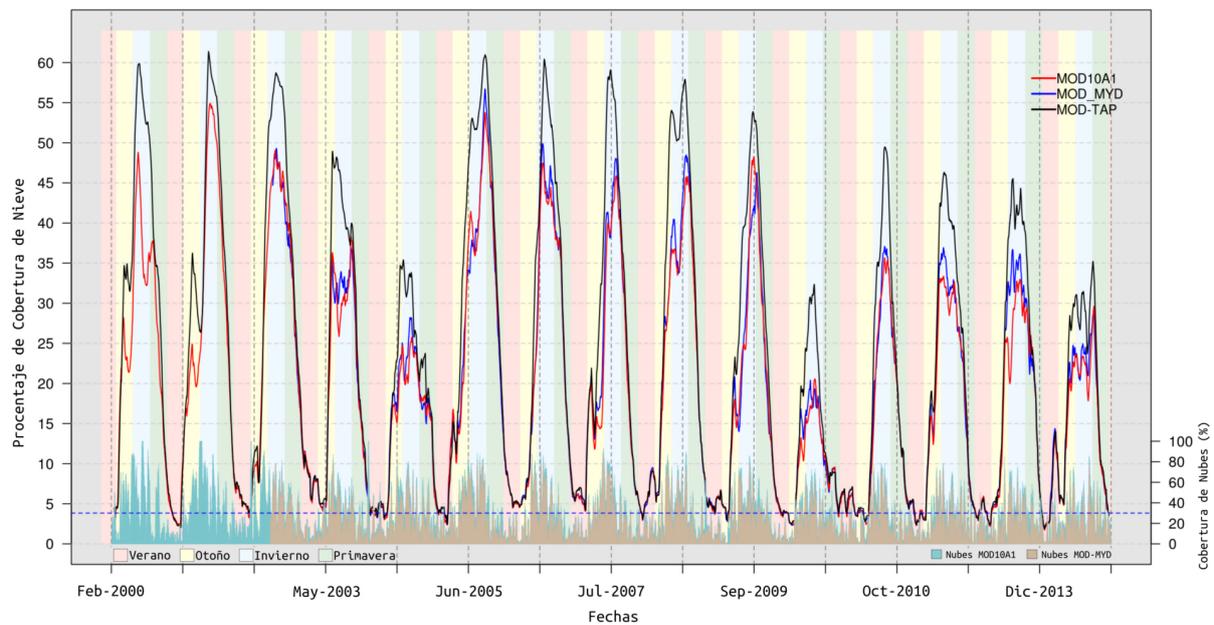


Figura 4: Series temporales de cobertura nival y cobertura de nubes para la cuenca alta del río Mendoza. Las series de cobertura nival (parte superior) han sido obtenidas de las imágenes MOD10A1 y de los productos MOD-MYD y MODTAP. Para una mejora en la representación gráfica las tres series se presentan como medias móviles con ventanas bilaterales de 31 días. Las barras del sector inferior del gráfico corresponden al porcentaje de cobertura de nubes por día para las series MOD10A1 y MOD-MYD (filtradas a través de medias móviles con una ventana bilateral de 15 días). Los colores del fondo del gráfico muestran las estaciones del año (verano: rosado, otoño: amarillo, invierno: celeste, primavera: verde). La línea punteada azul representa el umbral de nubosidad de 30% utilizado para considerar como válidas las imágenes disponibles. Notar la mayor incidencia de nubes durante los meses fríos del año.

río Mendoza. Las tres series de nieve poseen un comportamiento similar, alcanzando los máximos de cobertura en los meses invernales y decayendo en porcentaje hasta finales de verano e inicios del otoño. En primer lugar, en esta figura puede verse un incremento en las curvas de porcentaje de cobertura de nieve para las series MOD-MYD y MOD-TAP sobre la original MOD10A1 especialmente en invierno, consistente con la mayor frecuencia de nubes en esta época del año (Figura 3, parte inferior). Las coberturas nivas máximas alcanzadas durante los últimos 15 años son muy variables y van desde 25% de la superficie total de la cuenca en 2010 hasta 60% en el año 2005. A partir de este año y hasta el 2014, se observa una reducción paulatina de los valores máximos de cobertura nival para la cuenca del río Mendoza. La Tabla I resume las estadísticas

anuales de cobertura niva en la cuenca basadas en la serie MOD-TAP, donde es posible observar grandes diferencias entre años nevadores y años secos.

El comportamiento de la línea inferior de nieve en la cuenca entre 2000 y 2014 posee una importante variación estacional, alcanzando valores menores a 2.500 msnm en invierno, consecuente con las épocas de mayor cobertura nival, y valores superiores a 4.200 msnm en la estación de verano (ver Tabla I). También es posible observar un incremento en los valores mínimos de la serie analizada, sobre todo a partir del año 2007 (ver Fig. 5).

El promedio anual del número de días consecutivos que cada píxel de la cuenca

Año	Cobertura prom. (%)	Duración prom. (días)	Cobertura mín. (%)	Fecha cob. mín.	Cobertura máx. (%)	Fecha cob. máx.	Altura mín. (m)	Fecha alt. mín.	Altura máx. (m)	Fecha alt. máx.
2001	28.31	103	0.49	6 Feb	64.50	2 Ago	2238	20 Jul	4242	18 Feb
2002	28.84	105	2.11	16 Feb	63.98	9 Ago	2236	1 Ago	4220	15 Ene
2003	22.53	82	2.11	23 Dic	57.92	28 Sep	2052	4 May	4169	21 Mar
2004	17.72	65	0.55	6 Feb	47.26	10 Oct	1903	11 Jun	4282	19 Feb
2005	31.91	116	0.49	16 Ene	66.14	6 Sep	1910	24 Abr	4368	16 Ene
2006	25.7	94	2.39	2 Feb	63.59	17 Jul	2279	20 Sep	4224	18 Feb
2007	25.46	93	2.05	22 Dic	64.55	11 Jul	1845	4 Ago	4268	22 Dic
2008	27.99	102	0.76	16 Ene	64.38	24 Ago	1848	29 May	4231	14 Ene
2009	23.45	86	0.96	12 Feb	58.87	13 Sep	2106	19 Ago	4278	12 Feb
2010	12.4	45	1.02	25 Dic	40.79	18 Jul	1907	18 Jul	4266	26 Dic
2011	17.42	64	0.48	2 Feb	58.14	23 Ago	2096	31 Jul	4425	2 Feb
2012	20.45	75	0.51	8 Mar	52.72	12 Jul	2117	3 Jul	4432	10 Feb
2013	20.12	73	0.55	5 Feb	55.56	13 Ago	1727	21 Jul	4449	5 Feb
2014	17.11	62	0.22	31 Ene	53.04	14 Sep	1803	23 May	4479	10 Feb
PROM	22.82	83	1.05	-----	57.96	-----	2005	-----	4310	-----

Tabla I: Estadísticas anuales de cobertura de nieve para la cuenca del río Mendoza calculadas en base a la serie MOD-TAP. Las alturas mínimas y máximas de la línea inferior de nieve fueron calculadas integrando las imágenes MOD-TAP sobre el Modelo Digital de Elevación SRTM.

permanece con cobertura nubosa se muestra en la Figura 6. Aquí se observa que este valor oscila entre 0 y 45 días con claras diferencias entre el sector bajo (<2500 msnm) y las partes más elevadas y nubosas de la cuenca.

La Figura 7 muestra, en forma comparativa, el número de días con cobertura nival para los dos años de mayor (2005) y menor (2010) acumulación de nieve en la cuenca, junto con la

hipsometría promedio de la cobertura nival, es decir la distribución de la nieve en relación a la elevación. Aquí puede verse que la duración de la cobertura nival para el año 2010 (45 días en promedio) es sensiblemente menor que para el año 2005 (116 días; ver Tabla I). También es clara la diferencia en cuanto al área que ocupó la nieve en estos años, donde el año 2010 posee la mitad del área cubierta promedio que el año 2005.

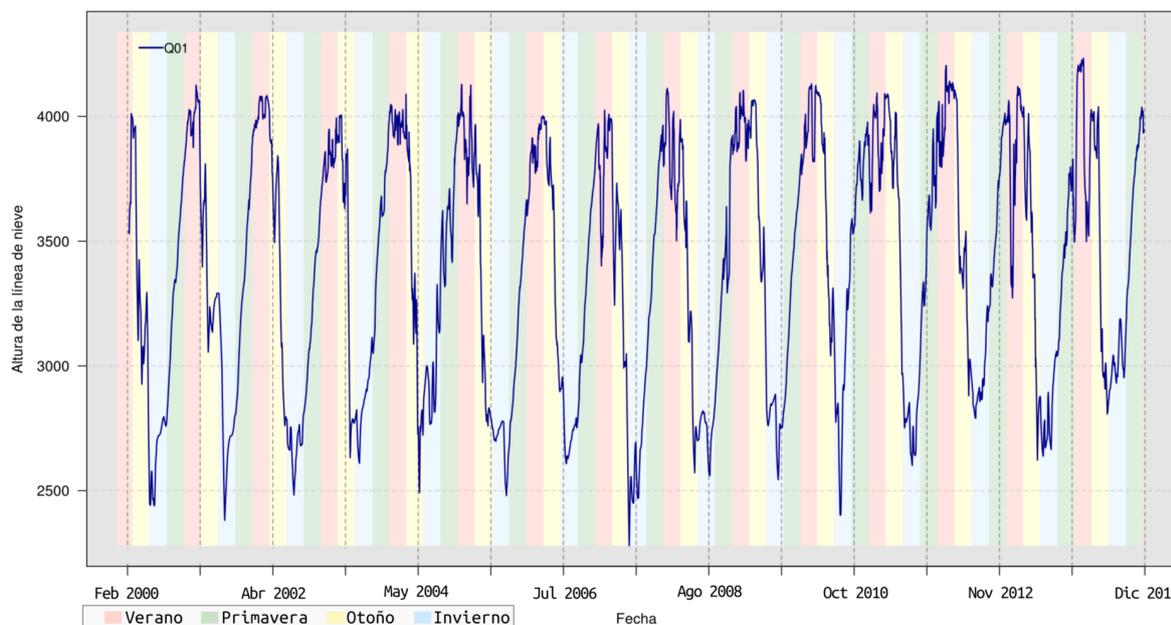


Figura 5: Evolución de la línea inferior de nieve (filtrado a través de medias móviles de 15 días) obtenida de la serie de imágenes MOD-TAP superpuesta sobre el modelo digital de elevaciones SRTM (ver texto para mayores detalles).

La Figura 8 muestra un mapa con el número medio de días con cobertura de nieve por año comparado con la distribución de cuerpos de hielo (glaciares descubiertos, cubiertos y de escombros) mayores de 1 km^2 de la cuenca según los mapas del Inventario Nacional de Glaciares (IANIGLA-ING 2012). Claramente, los sectores con mayor duración de cobertura nival corresponden con los sitios ocupados por glaciares, validando los resultados presentados en este estudio. Sin embargo, analizando la frecuencia de días con nieve encontramos que los distintos cuerpos de hielo (glaciares descubiertos, cubiertos por detrito y glaciares de escombros) muestran diferencias interesantes, que coinciden con su genética y características morfo-climáticas específicas (Tabla II). Los glaciares descubiertos, caracterizados por tener una superficie de hielo limpio sin detritos, se localizan en los sectores más nevadores de la cuenca con un promedio de más de 324 días por año cubiertos de nieve. Por otra parte, los glaciares cubiertos por detritos se encuentran ubicados en sectores con una frecuencia menor de cobertura de nieve (215 días de cobertura media anual), mientras que los

Tipo de superficie	Duración promedio de cobertura de nieve (días)			
	Media	Desvio Std.	Mínimo	Máximo
Hielo descubierta	324	35	171	364
Hielo cubierto por detritos	215	50	49	350
Glaciar de escombros	151	48	59	22

Tabla II: Estadísticas de cobertura de nieve de los distintos tipos de cuerpos de hielo (mayores a 1 km^2 de superficie) identificados en la cuenca. Notar la mayor frecuencia de nubes sobre los cuerpos de hielo descubierta y la menor frecuencia en los glaciares de escombros.

glaciares de escombros, característicos de sitios más secos, poseen valores medios de 151 días con cubierta de nieve/año.

La comparación entre los valores mínimos anuales de nieve y la cobertura glacial también muestra resultados interesantes. La superficie cubierta por glaciares en la cuenca de estudio alcanza un 6,9% ($554,4 \text{ km}^2$), de los cuales el 2,9% corresponde a

glaciares descubiertos y el 4% restante a glaciares cubiertos y de escombros (IANIGLA-ING 2012). Los mínimos anuales y los mapas de cobertura nival mínima muestran que en los veranos que siguen a los inviernos nevadores, la superficie cubierta por nieve se encuentra cercana al valor del área ocupada por glaciares descubiertos (Febrero 2002: 2,11%; Febrero 2006: 2,39%; Tabla I), y que además la nieve se concentra mayormente en los sitios donde están estos cuerpos de hielo. Luego de inviernos secos, el porcentaje mínimo de cobertura de nieve es significativamente más bajo (Enero 2005: 0,49%, Febrero 2011: 0,48%; Tabla I) y sólo se encuentra en los sectores más elevados y protegidos del área de acumulación de los glaciares. Estas diferencias muestran además que el algoritmo utilizado puede efectivamente discriminar nieve de hielo, y por lo tanto los mapas de nieve no estarían mayormente influenciados por la existencia de hielo descubierta que existe en la cuenca.

4. DISCUSIÓN

Los análisis de las series de cobertura de nieve MOD-MYD y MOD-TAP muestran una menor pérdida de información con respecto al producto “básico” MOD10A1, normalmente usado en estudios de nieve en base a imágenes MODIS, si se tiene en cuenta un umbral cualquiera para aceptar/descartar información (Figura 3). En el caso de la serie MOD-MYD esta reducción de la pérdida de información se logra mediante un procedimiento simple y eficiente basado en la integración de información de los sensores Aqua y Terra, los cuales cubren la zona de estudio en distintas horas del día (Riggs et al, 2006). Por otra parte es interesante notar que, como se muestra en la Figura 3, la distribución de la cobertura nubosa no es uniforme a lo largo del año. En la cuenca alta del río Mendoza la presencia de nubes es sustancialmente mayor en el período otoño-invierno que durante los meses cálidos de primavera-verano. Este aumento de la nubosidad en los meses fríos está relacionado con una mayor frecuencia de tormentas en la cuenca durante el período de acumulación nival en la misma.

El producto MOD-TAP, a diferencia de los anteriores, fue generado utilizando información preexistente en cada píxel de los sectores ocupados por nubes. El proceso de generación de esta serie es también relativamente simple y podría interpretarse no como una interpolación de información, sino más bien como una “actualización” del estado de cobertura de los píxeles con nubes en base a información disponible al momento que se disipan las nubes. Luego de un lapso con cobertura nubosa, un sector (píxel) en la cuenca puede continuar con la cobertura que tenía antes del periodo con nubes (nieve/suelo descubierta), cambiar de nieve a suelo descubierta, o cambiar de suelo descubierta a nieve. Esta tercera opción es la más común durante el periodo invernal, cuando se da la mayor nubosidad por los frentes de tormentas que depositan la mayor parte de las precipitaciones en forma de nieve en la cuenca. La actualización de información de cobertura entonces se realiza sobre estos píxeles con nubes lo que permite rellenar los vacíos de información en la series

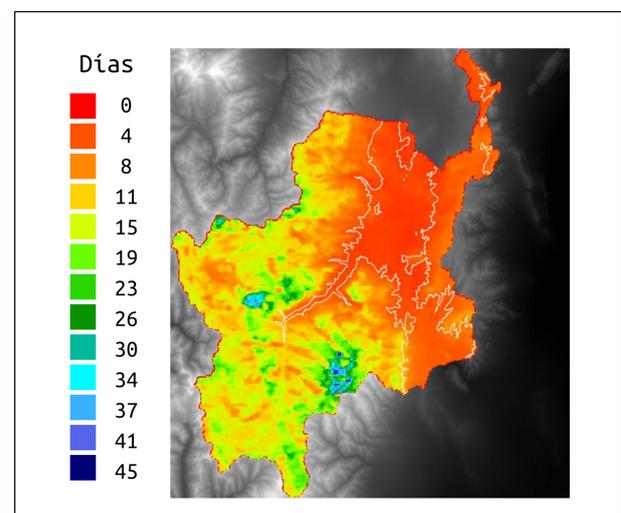


Figura 6: Distribución espacial del promedio anual de días consecutivos de cobertura nubosa en la cuenca del río Mendoza. Notar la mayor concentración de nubes por encima de los 2500 msnm (línea blanca). La alta frecuencia de nubes en el sector sur-centro de la cuenca (sector conocido como “Cordón del Plata”) es también notable.

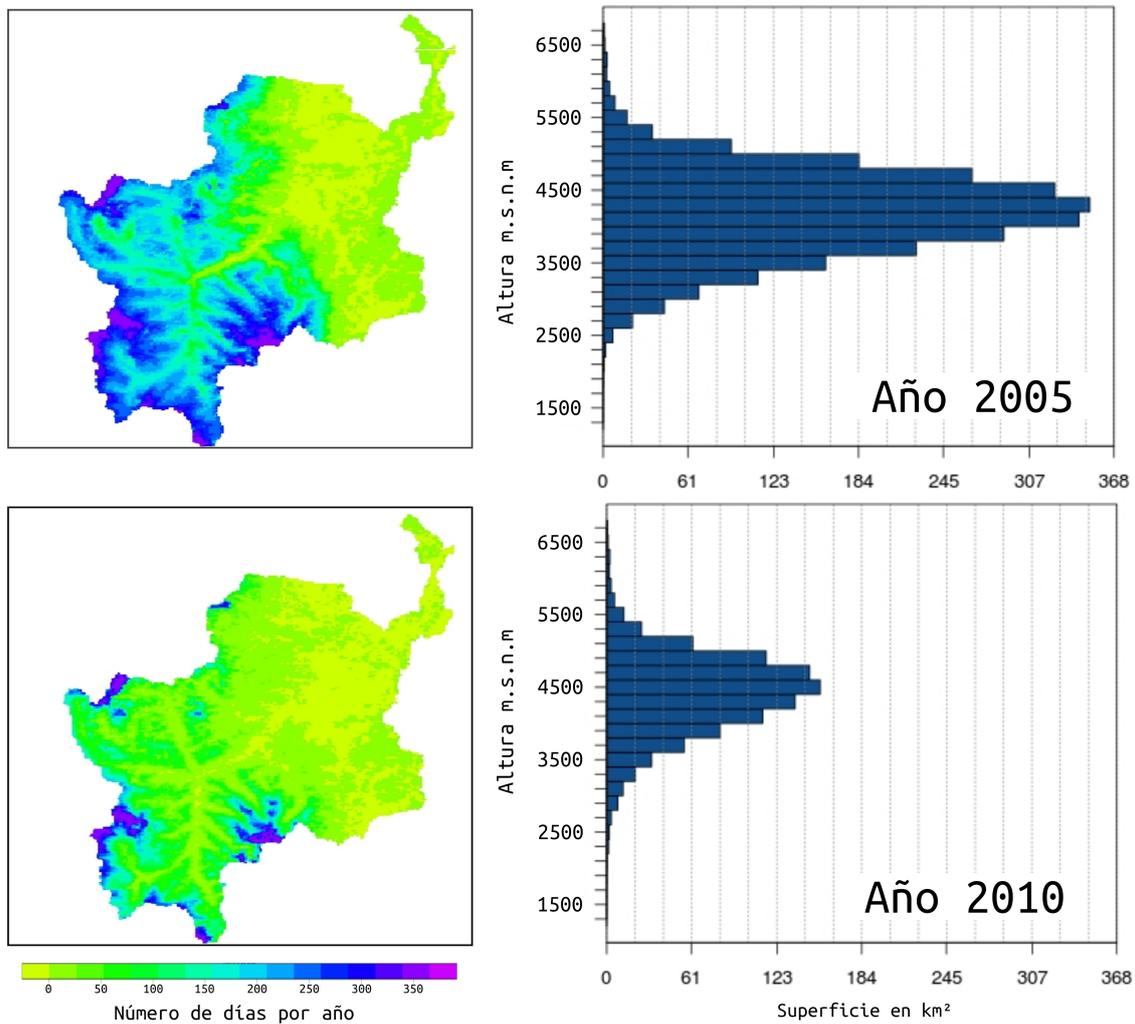


Figura 7: Izquierda: Distribución espacial de la nieve (en número de días por año) para el año más húmedo (2005) y más seco (2010) de la serie analizada. Derecha: Distribución altitudinal (hypsometría) promedio de la nieve para los años indicados.

MOD-MYD. Este procedimiento novedoso puede resultar de interés para estudios que requieran series continuas de cobertura de nieve en cuencas de montaña. El impacto de este proceso en esta cuenca en particular es más notorio durante el invierno, cuando la cobertura nubosa en la cuenca aumenta sensiblemente (Figura 3 y 4). Durante la temporada de verano, cuando la cobertura de nubes es relativamente baja, las series MOD10A1, MOD-MYD y MOD-TAP se asemejan (Figura 3).

Los numerosos análisis y aplicaciones que pueden

desarrollarse a partir de las series de cobertura de nieve discutidas en este trabajo pueden además complementarse con estudios de la distribución espacial y temporal de las nubes en la cuenca. Un ejemplo interesante se muestra en la Figura 6, donde pueden distinguirse claras diferencias en la distribución espacial de días consecutivos con nubes (en promedio por año) en la cuenca. Si bien la mayor frecuencia de nubes se presenta en el sector alto de la cuenca donde justamente se produce la mayor cobertura de nieve y las precipitaciones más abundantes, el sector ubicado al sureste de la cuenca (conocido como el “Cordón

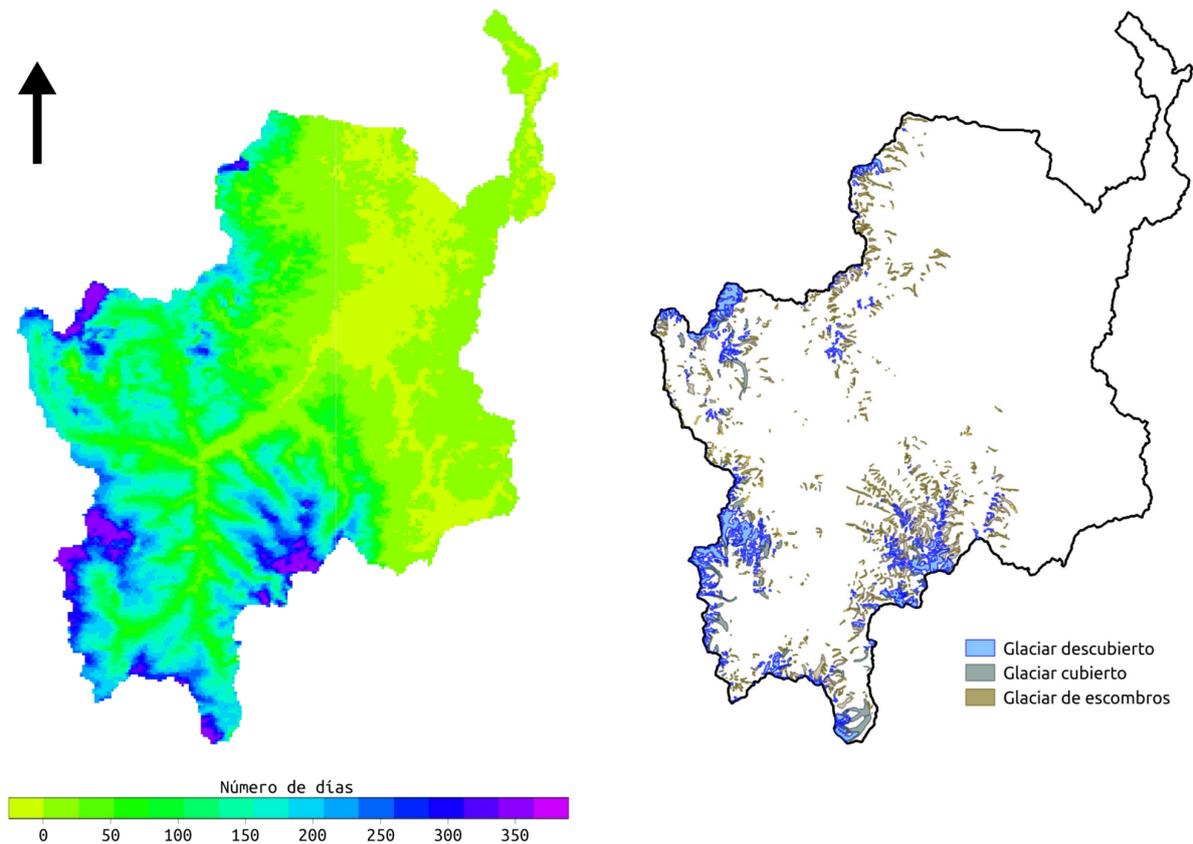


Figura 8: Duración promedio, en días por año, de la cobertura de nieve para el periodo 2001-2014 (izquierda) comparada con la distribución de los cuerpos de hielo en la cuenca del río Mendoza (derecha). Notar la excelente correspondencia entre los sitios con mayor frecuencia de nieve y la ubicación de los glaciares en la cuenca.

del Plata”) alcanza los valores máximos de días consecutivos con cobertura nubosa (Figura 4). Este sector en particular recibe normalmente precipitaciones de origen Pacífico en invierno y de origen Atlántico en los meses cálidos (Viale & Garreaud 2014), lo que podría explicar la mayor frecuencia de nubes con respecto a otros sectores más elevados de la cuenca mayormente dominados por precipitaciones invernales de origen Pacífico. Los análisis de los mapas también mostraron que la línea inferior de nieve muestra una alta variación estacional pero los máximos y mínimos anuales de esta serie no varían de gran manera (Figura 7). En el año 2005 la nieve alcanzó una gran parte de la cuenca y un altura mínima de 1910 msnm mientras que en 2010, un año mucho menos nevador, la altura

mínima de la nieve no fue tan diferente y alcanzó lo 1907 msnm (Tabla I). La relación entre la cobertura de nieve y la ubicación de los glaciares es consistente y confirma que los sitios donde se ubican los cuerpos de hielo son claramente los más nevadores y con mayor cobertura nubosa de la cuenca. Se pudo observar, incluso, que durante los veranos que siguen a los inviernos secos, gran parte de los glaciares no mantiene su cobertura de nieve, la cual se concentra solamente en sectores elevados y protegidos de los mismos. Los porcentajes de cobertura nival durante estos años extremos alcanza sólo alrededor del 0,5% de la superficie de la cuenca (Tabla I) mientras que los glaciares totalizan casi un 7% de la misma (glaciares descubiertos: 2,9%).

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado las variaciones diarias en la cobertura nival de la cuenca alta del río Mendoza para el periodo 2000-2014 en base a imágenes MODIS de los satélites Terra y Aqua. Los resultados resaltan la gran utilidad de estas imágenes para generar información sobre las variaciones en la cobertura de nieve en este sector de los Andes, así como su distribución espacial y su relación con la hipsometría de la cuenca. Los análisis demuestran además que es posible hacer inferencias a escala semidiaria en la cobertura de nubes, a través de la información disponible, dado que se cuenta con información de nubosidad en dos horarios del día. Mediante metodologías simples hemos podido integrar las imágenes diarias de los satélites Terra y Aqua para reducir los efectos negativos de la cobertura de nubes y aumentar en forma sustancial los porcentajes de información válida disponible sobre cobertura de nieve. El procedimiento que aquí se presenta es novedoso para la Cordillera de los Andes y permite disminuir en forma simple y eficiente la proporción de valores interpolados y la incertidumbre general de los análisis de cobertura nival en áreas seleccionadas. La metodología aplicada para la obtención de la serie MOD-TAP brinda la posibilidad de contar con un máximo utilizable de información diaria de cobertura de nieve, logrando obtener series continuas aún en la temporada invernal cuando la pérdida de información por presencia de nubes es marcadamente mayor que durante los meses secos del verano.

Los análisis revelaron la existencia de una alta concordancia espacial entre la ubicación de glaciares en la cuenca alta del río Mendoza y los sectores de mayor persistencia de nieve en el año. Esta validación cruzada de la información está relacionada con la morfometría de la cuenca pero fundamentalmente indica que los resultados de los análisis tienen un alto grado de consistencia espacial. Las herramientas para el procesamiento de los datos han sido generadas y organizadas en un sistema de procesamiento semi-automatizado, con lo cual el análisis puede

ser repetido y ampliado a cuencas similares en un tiempo relativamente breve y con un costo computacional comparativamente bajo, permitiendo así conocer la nivología de cualquier sector del mundo con características similares a esta cuenca. Los datos obtenidos de evolución y distribución de nieve contribuyen al conocimiento de la nivología de la cuenca y están disponibles para su utilización como información de base para modelos hidrológicos y climáticos.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por la IRIACC (International Research Initiative on Adaptation to Climate Change) a través del proyecto VACEA (Vulnerability and Adaptation to Climate Extremes in the Americas), y por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET, Argentina). Agradecemos al Earth Observing System Data and Information System de la National Aeronautics Space Administration (NASA-EOSDIS) por proveer las imágenes MODIS utilizadas en los análisis, y al personal del Inventario Nacional de Glaciares (IANIGLA-ING) por los mapas de los glaciares. La página web desarrollada por René Garreaud y Claudio Bravo del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (<http://www.dgf.uchile.cl/rene/MODIS/>) fue una de las primeras motivaciones para realizar este trabajo. Se agradece especialmente la asistencia de la Editora Dra. Mariana Barrucand, y los comentarios y sugerencias de dos revisores que sirvieron para mejorar la calidad de este artículo.

REFERENCIAS

- Allaire JJ, Cheng Joe, Xie Yihui, McPherson Jonathan, Chang Winston, Allen Jeff, Wickham Hadley and Hyndman Rob (2015).rmarkdown: Dynamic Documents for R. R package version 0.7. <http://CRAN.R-project.org/package=rmarkdown>.
- Barnes, W. L., Pagano, T. S., and Salomonson, V. V., 1998. Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) on EOS-AM/1. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36,

- 1088-1100.
- Bergeron, J. et al., 2014. Snow cover estimation using blended MODIS and AMSR-E data for improved watershed-scale spring streamflow simulation in Quebec, Canada. *Hydrological Processes*, 28(16), pp.4626–4639. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.10123> [Accessed January 14, 2015].
- Bruniard, Enrique D., Moro Clelia O. 1994. Los regímenes fluviales de alimentación sólida en la República Argentina : ensayo de elaboración de un modelo hidroclimático de la vertiente oriental de los Andes. Academia Nacional de Geografía Buenos Aires, Argentina. 81 p. (Publicación especial ; 7)
- Cea López, C., Cristobal Rosselló, J. & Pons Fernandez, X., 2005. Mejoras en la determinación de la cubierta nival mediante imágenes LandSat y MODIS. *EL ACCESO A LA INFORMACIÓN ESPACIAL Y LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS GEOGRÁFICAS* pp.65–78.
- Chuvieco, E. 1995. Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia. Barcelona España. 586 pp.
- Dwyer, J. & Schmidt, G., 2006. The MODIS reprojection tool. *Earth Science Satellite Remote Sensing: Vol. 2: Data, Computational Processing, and Tools*, 1, pp.162–177.
- IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares. 2012. Subcuencas de los ríos de las Cuevas y de las Vacas, cuenca del río Mendoza, Provincia de Mendoza. IANIGLA-CONICET, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Pp. 67.
- Immerzeel, W.W. et al., 2009. Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 113(1), pp.40–49. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2008.08.010>.
- Jain, S. K., Goswami, A. and Saraf, A. K., 2009: Role of elevation and aspect in snow distribution in Western Himalaya. *Water resources management*, 23(1): 71-83.
- Justice, C.O. et al., 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), pp.3–15.
- Farr, T. G., et al. (2007), The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Landau, L., 2008. PRINCIPLES OF SNOW HYDROLOGY. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0> [Accessed January 14, 2015].
- Mas, J.-F., 2011. Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio, Cap 1 Presentación del sensor MODIS. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Primera edición, ISBN: 978-607-7908-55-5
- Masiokas, M.H. et al., 2006. Snowpack Variations in the Central Andes of Argentina and Chile , 1951 - 2005: Large-Scale Atmospheric Influences and Implications for Water Resources in the Region. *Journal of Climate*, 19, pp.6334-6352.
- Morábito, J. et al., Presencia de nitratos en agua en los oasis Norte y Centro de Mendoza, Argentina: áreas regadías de los ríos Mendoza y Tunuyán Superior. , 3(1).
- Qu, J. j. et al., 2006. *Earth Science Satellite Remote Sensing Vol. 2: Data, Computational Processing, and Tools*,
- R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Robert J. Hijmans (2015). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 2.3-40. <http://CRAN.R-project.org/package=raster>
- Rango, A. and Martinec, J., 1995: Revisiting the degree day method for snowmelt computation. *Journal of American Water Resources*, 31(4): 657–669.
- Riggs, G. & Hall, D., 2011. MODIS Snow Cover Algorithms and Products – Improvements for Collection 6. , pp.163–171.

- Riggs, G., Hall, D. & Salomonson, V., 2006. MODIS snow products user guide to collection 5. Digital Media, 6, pp.1–80. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?en&btnG=Search&q=intitle:MODIS+Snow+Products+User+Guide+to+Collection+5#0>.
- Roy, A., Royer, A. & Turcotte, R., 2010. Improvement of springtime streamflow simulations in a boreal environment by incorporating snow-covered area derived from remote sensing data. *Journal of Hydrology*, 390(1-2), pp.35–44. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.027>.
- Salcedo, A.P. & Cogliati, M.G., 2014. Snow Cover Area Estimation Using Radar and Optical Satellite Information. , (October), pp.514–523.
- Seidel, Klaus, Martinec, Jaroslav. 2004 Remote Sensing in Snow Hydrology. Runoff Modelling, Effect of Climate Change. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-07417-2
- Singh, P., Kumar, N. and Arora, M., 2000: Degree day factors for snow and ice for Dokriani Glacier Garhwal Himalayas. *Journal of Hydrology*, 235: 1-11.
- Viale, M. and R. Garreaud, 2014: Summer Precipitation Events over the Western Slope of the Subtropical Andes. *Mon. Wea. Rev.*, 142, 1074–1092.
- Zalazar L and 12 others (2012) An updated glacial and periglacial inventory of the Río Mendoza basin in the Central Andes of Argentina (1:250,000). In *World Glacier Monitoring Service, Fluctuations of glaciers 2005–2010 (Vol. X)*, ed. Zemp M and 6 others. ICSU (FAGS)/IUGG (IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zürich, 2–58. http://www.wgms.ch/fog/wgms_2012_fogX.pdf.
- Zeileis Achim and Grothendieck Gabor (2005). zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series. *Journal of Statistical Software*, 14(6), 1-27. URL <http://www.jstatsoft.org/v14/i06/>

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado,