

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/338014432>

# Cobertura de nieve en las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas (Argentina) y su relación con la morfometría

Article · December 2019

CITATIONS

0

READS

31

5 authors, including:



**María Eugenia Beget**

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

17 PUBLICATIONS 22 CITATIONS

SEE PROFILE



**Carlos Marcelo Di Bella**

Universidad de Buenos Aires

103 PUBLICATIONS 1,887 CITATIONS

SEE PROFILE



**Fernanda Julia Gaspari**

Universidad Nacional de La Plata

46 PUBLICATIONS 103 CITATIONS

SEE PROFILE



**Carolina Aumassanne**

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

13 PUBLICATIONS 1 CITATION

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Evaluación y seguimiento satelital del cambio global. [View project](#)



Study of environmental-hydrological service to contribute to the sustainability of the Serrana Region services. Argentina. [View project](#)

Recibido 19 de junio de 2018 // Aceptado 21 de enero de 2019 // Publicado online 04 de diciembre de 2019

# Cobertura de nieve en las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas (Argentina) y su relación con la morfometría

AUMASSANNE, C.M.<sup>1</sup>; BEGET, M.E.<sup>2</sup>; ORICCHIO, P.<sup>2</sup>; DI BELLA, C.M.<sup>2,3,4</sup>; GASPARI, F.<sup>5</sup>

## RESUMEN

En cuencas de régimen nival las variaciones temporales y espaciales de la cobertura de nieve afectan significativamente la disponibilidad de agua. Las características morfológicas de la cuenca afectan la distribución y permanencia de la nieve. Su estudio detallado permite comprender el funcionamiento del sistema hidrológico y de esta manera realizar su planificación y manejo integral. Se utilizó un producto derivado de imágenes satelitales provistas por el sensor MODIS (MOD10A2), con el objetivo de evaluar el área cubierta por nieve y su variación espacio-temporal en la cuenca alta del río Colorado mediante un análisis espacial del relieve (altura, pendiente y orientación) desde el año 2000 a 2015. La información derivada de sensores remotos permite el seguimiento de grandes extensiones de territorio de forma permanente, objetiva, económica y en tiempo real, y complementa aquella provista por estaciones meteorológicas tradicionales. Los resultados muestran una tendencia de disminución de la extensión de la cubierta de nieve a partir del año 2005, lo cual se ve reflejado en la disminución del derrame anual de los ciclos hidrológicos posteriores. Se identificaron zonas con cobertura permanente de nieve que se ubican principalmente en la subcuenca del río Grande y otras con mayores variaciones temporales (interanual e intranual) centro y sur de ambas subcuencas.

**Palabras clave:** manejo de cuenca, MOD10A2, teledetección.

## ABSTRACT

*In snowmelt basins, temporal and spatial variations of snow cover significantly affect water availability. The morphological characteristics of the basin affect the distribution and permanence of the snow. A detailed analysis should contribute to understand the functioning of the hydrological system and in this way to carry out its planning and integral management. A product derived from satellite images provided by the MODIS sensor (MOD10A2) was used, with the objective of evaluating the area covered by snow and its spatio-temporal variation in the upper basin of the Colorado River, by means of a spatial analysis of the morphometric parameters (elevation, slope, aspect), from the year 2000 to 2015. The information derived from remote sensors allows the*

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Anguil, Agencia de Extensión Rural (AER) 25 de Mayo, General Pico 720, (8201) Colonia 25 de Mayo, La Pampa, Argentina. Correo electrónico: aumassanne.carolina@inta.gob.ar

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto de Clima y Agua, Nicolás Repetto y De los Reseros s/n (1686) Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup>Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

<sup>4</sup>Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Argentina.

<sup>5</sup>Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, La Plata, Argentina.

*monitoring of large areas of territory in a permanent, objective, economic and real time, and complements that provided by traditional meteorological stations. Our results show a tendency of diminution of the extension of the cover of snow from the year 2005, which is reflected in the decrease of the annual spill of the hydrological cycles later. Areas with permanent snow cover were identified, which are located mainly in the Grande River basin and others with greater temporal variations (inter-annual and intra-annual) in the center and south of both basins.*

**Keywords:** basin management, MOD10A2, remote sensing.

## INTRODUCCIÓN

En cuencas de régimen nival, las variaciones espaciales y temporales de la cubierta de nieve determinan en gran medida la disponibilidad de agua, siendo un claro indicador de los recursos hídricos almacenados (Martinec *et al.*, 1991; Baumgartner *et al.*, 1987; Tripodi y Fernandez, 2000; Dahri *et al.*, 2011; Masiokas *et al.*, 2013). De esta manera, la precipitación de invierno acumulada en forma de nieve crea reservorios de agua que durante los meses de primavera y verano conforman una fuente importante del escurrimiento de los ríos (Masiokas *et al.*, 2006) y por lo tanto del agua disponible para riego en muchos valles de la región.

El almacenamiento nival se produce según la macromorfología y la distribución altimétrica de las cuencas (Hantel *et al.*, 2000; Sloan *et al.*, 2004, Lascano y Villalba 2007, Salcedo 2011). Las características morfológicas de la cuenca (elevación, orientación, pendiente, entre otras) afectan la distribución de la nieve (Tripodi y Fernandez 2000; Salcedo, 2011) al caracterizar indirectamente gradientes de temperatura y precipitación (Boninsegna y Llop, 2015). Por una parte, la acumulación de nieve aumenta con la altitud y las tasas de deshielo disminuyen simultáneamente con esta (Ehrler *et al.*, 1997). Además, la superficie y distribución altimétrica de una cuenca permiten el desarrollo del almacenaje de agua en escalas de tiempo iguales o mayores a un año. Por otra parte, a mayor altura y mayor latitud, el período durante el cual la precipitación se acumula y permanece retenida en fase sólida es más largo; esta es la condición para el desarrollo de las llamadas "nieves eternas" o de cuerpos de hielo (Lascano y Villalba, 2007). También, la orientación de las laderas es una variable que influye en la permanencia o fusión de la nieve, afectando directamente las horas de insolación a lo largo del día. En el hemisferio sur, por ejemplo, aquellas laderas orientadas al norte son las que reciben mayor cantidad de horas de sol al día, mientras aquellas orientadas al sur se encuentran mayormente a umbría.

Para cuantificar la acumulación y fusión de nieve el uso de datos provistos por estaciones meteorológicas, cateos o colchones de nieve no suelen ser suficientes en cuencas de grandes extensiones debido principalmente a la baja representatividad espacial de estas mediciones (Lascano y Velasco, 2007). En general, no permiten caracterizar la enorme variabilidad de ambientes y condiciones existen-

tes en áreas de montaña (Cara *et al.*, 2006). Además, en dichas áreas, el acceso a la instalación y el mantenimiento de instrumentos terrestres se dificulta por las condiciones meteorológicas adversas. En este contexto, los sensores remotos montados sobre plataformas satelitales resultan en una herramienta útil para la estimación del área cubierta por nieve gracias a las características espectrales propias de la nieve. Esta presenta una respuesta espectral muy elevada en las longitudes de onda del espectro visible (entre 0,4 y 0,7  $\mu\text{m}$ ), que disminuye conforme aumenta la longitud de onda, siendo muy baja en torno a 1,5  $\mu\text{m}$ , muy diferente de otras cubiertas circundantes (ej. el suelo, la vegetación o las rocas). De esta manera, y a través de esta información, es posible determinar aquellas áreas con acumulación de nieve con una alta frecuencia temporal (Paudel y Andersen 2011; Mhawej *et al.*, 2014) y una resolución espacial adecuada para este tipo de fenómeno.

Diversos autores han utilizado imágenes satelitales en el seguimiento espacial y temporal de la cubierta de nieve en diferentes regiones. Un gran número de ellos han utilizado, en diferentes aplicaciones, productos generados a partir de la reflectancia medida por el sensor MODIS ("Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer"). Se ha utilizado el producto MOD10A2 para evaluar la variabilidad temporal del área cubierta por nieve (ej. Wang *et al.*, 2008; Herms y Jorge, 2012; Telesca *et al.*, 2014) y la distribución espacial de otras áreas cubiertas de nieve (Cogliati *et al.*, 2015; Tahir *et al.*, 2015). A su vez Dahri *et al.* (2011) y Cartes (2009) estimaron la distribución espacial y temporal de la cubierta de nieve para predecir la escorrentía en distintas cuencas, al igual que Tekeli *et al.* (2005); Andreadis y Lettenmaier, (2006) y Walters *et al.* (2014). Además, el MOD10A2 se ha utilizado para la estimación del área cubierta por nieve como entrada de modelos hidrológicos (ej. Stehr *et al.*, 2009).

En un valle de riego como el del río Colorado, ante un escenario de cambio climático y sujeto a cambios en el uso y la cobertura del suelo, particularmente una expansión del área agrícola regada, es necesario conocer la permanencia de la nieve en la cuenca alta, analizar sus variaciones anuales e interanuales y de esta forma, predecir la disponibilidad de agua remota a futuro. Con el objetivo de evaluar el área cubierta por nieve y su variación espacio-temporal en las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas, se utilizó el producto derivado de imágenes satelitales provistas

por el sensor MODIS (MOD10A2) y análisis espacial del relieve. La metodología propuesta en este trabajo constituye una herramienta sencilla, semiautomática y de bajo costo para cuantificar el área cubierta por nieve, y de esta forma proveer información para el manejo sustentable de los recursos hídricos en un sector de la Cordillera de los Andes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio comprendió las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas, principales afluentes del río Colorado (figura 1). Este presenta una marcada estacionalidad primavero-estival, alimentado por la fusión de la nieve acumulada en la Cordillera Principal (COIRCO, 2013). La subcuenca del río Grande se ubica al sur de la provincia de Mendoza, parte oriental de la cuenca alta del río Colorado, con una extensión de 10.405 km<sup>2</sup>, de régimen nival (Lauro *et al.*, 2016), y un caudal medio anual de 111 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Sobre la porción suroeste de la cuenca del río Colorado se ubica la subcuenca del río Barrancas, entre la provincia de Mendoza y Neuquén, con un área de drenaje de 3.544 km<sup>2</sup> y un caudal medio anual de 36,6 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública y Comité Interjurisdiccional del río Colorado, 2013). Con una superficie total de 13.949 km<sup>2</sup>, que representa el 29% de la superficie de toda la cuenca del río Colorado, provee agua para el desarrollo de las actividades humanas, agrícolas e industriales que se realizan en la parte media y baja de la cuenca.

### Materiales

Para la cuantificación de nieve se utilizó el producto MOD10A2 (figura 2A; disponible en <http://reverb.echo.nasa.gov>), el cual muestra la extensión máxima de la cubierta de nieve en un compuesto de 8 días, con una resolución espacial de 500 metros (Hall *et al.*, 2001; 2006). Se utilizó la banda "Eight\_Day\_Snow\_Cover", correspondiente a la presencia o ausencia de nieve identificada por el sensor en un período de 8 días. La presencia de nieve en un píxel es registrada cuando para al menos uno de los 8 días se detecta dicha cobertura. Se trata, por lo tanto, de una aproximación que maximiza la presencia de nieve en un período de 8 días. El valor de píxel indica de manera cualitativa la presencia o ausencia de nieve (0 sin nieve, 25 dudoso, 50 nube y 200 nieve). Se utilizó la escena h12v12, y se analizó la serie años 2000 a 2015 en el período comprendido entre el 23 de abril y el 17 de noviembre de cada año, que corresponden a 27 fechas, conformando un total de 432 imágenes en la serie analizada. Se seleccionó dicho período anual, debido a que es en el momento en el que ocurren las nevadas en la zona.

La caracterización topográfica se realizó mediante la clasificación de altura, pendiente y orientación presentada por Aumassanne *et al.* (2018), las cuales se derivaron a partir de un modelo digital de elevación (MDE) (figura 2F). Para la clasificación de alturas se consideraron clases cada 1000 metros (500-1500/ 1501-2500/ 2501-3500/ >3500 m s.n.m), para pendiente cada 15° (0-15/ 16-30/ 31-45/>45 grados) y para orientación cada 90° (0-90 orien-



**Figura 1.** Ubicación de la cuenca del río Colorado y detalle de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.

tación NE/91-180 orientación SE/181-270 orientación SO /271-360 orientación NO). Debido a que las imágenes satelitales utilizadas para determinar la cobertura de nieve tienen una resolución de 500 m, el MDE, originalmente de 90 m fue remuestreado a 500 m (figura 2G).

**Metodología**

En primer lugar, se generó una imagen anual resultante de la agrupación de las 27 imágenes de MOD10A2 de cada año. Para conocer la fecha de ocurrencia de nieve se clasificaron los píxeles con nieve y su fecha de ocurrencia. Solo se extrajeron los píxeles que registraron nieve (valor 200) (figura 2B). Para identificar la marcha anual de la cobertura de nieve se agruparon las imágenes por años para obtener un archivo con las diferentes fechas (figura 2C), generando en total 16 archivos que representan los 16 años bajo análisis (figura 2D) y de 27 bandas cada uno según fechas julianas. Por último, para cada año se agruparon píxeles de acuerdo con el tiempo que estaban cubiertos por nieve (días con nieve), donde cada una de las clases corresponden a: 32 a 72 días, 80 a 120 días, 128 a 168 días y 176 a 216 días (figura 2E). Posteriormente, se calculó el área de cada clase por subcuencas y por año a partir de la cantidad de píxeles.

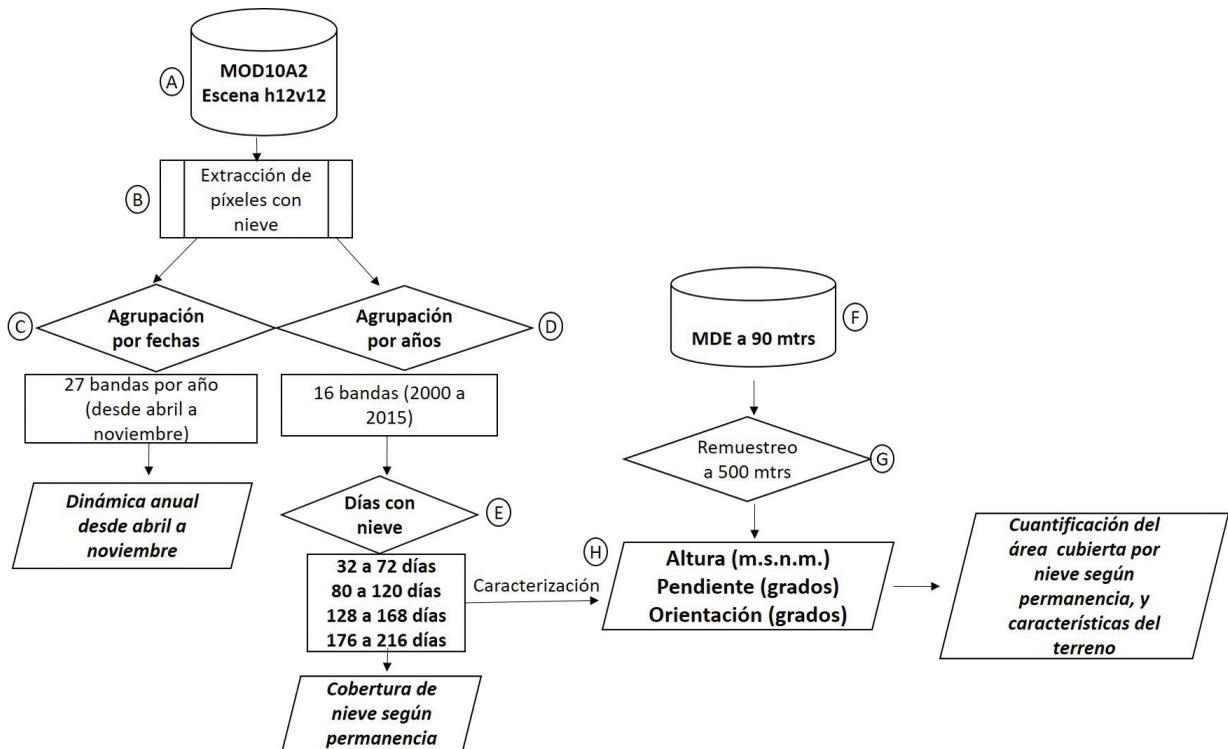
A partir de la cobertura de nieve obtenida por clases para cada año y con la información derivada del MDE se determinó en cada pixel la frecuencia de ocurrencia y las características del terreno (elevación, orientación y pendiente)

(figura 2H). Se calculó la superficie cubierta por nieve para cada clase en función de las características del terreno. Las diferencias de medias se comprobaron por medio de análisis de la varianza (ANOVA) para la comparación de las clases, con test de comparación de medias convencionales (Test de Fisher).

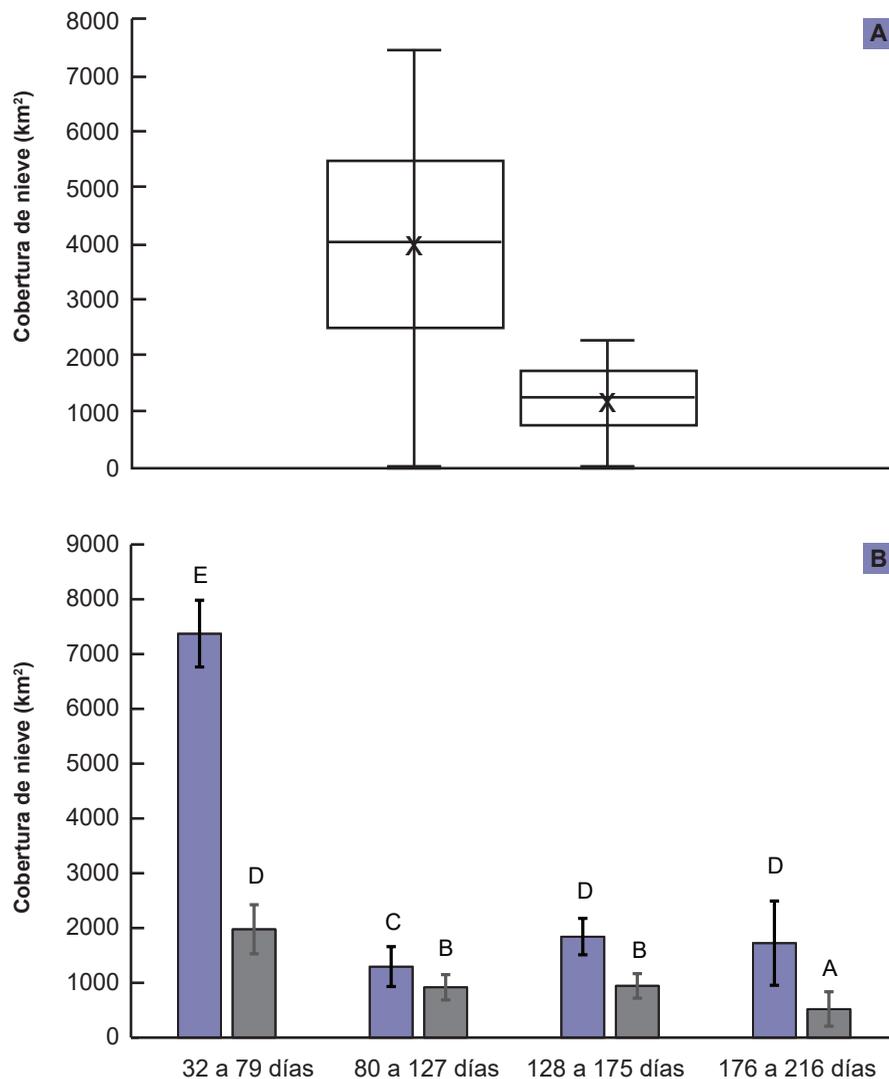
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La cobertura de nieve promedio entre abril y noviembre fue de 4.063 km<sup>2</sup> en la subcuenca del río Grande y 1.789 km<sup>2</sup> en la subcuenca del río Barrancas, con desvíos estándar de 1.887 km<sup>2</sup> y 999 km<sup>2</sup>, respectivamente (figura 3A). Esta superficie promedio representa el 39 y el 50% de la superficie de respectivas subcuencas. Para la subcuenca del río Grande, la fecha con máxima cobertura de nieve corresponde al 12 de julio del año 2000 con 8.698 km<sup>2</sup> y mínima el 23 de abril del año 2009, con 41 km<sup>2</sup>. En la subcuenca del río Barrancas el máximo se registró en la misma fecha, pero del año 2000 con 3.810 km<sup>2</sup>, y con la cobertura mínima se registró el 23 de abril, pero del año 2014, con 15 km<sup>2</sup>.

Al analizar la figura 3 B, se referencia a que la cobertura de nieve que se desarrolla en la subcuenca del río Grande es siempre superior a la del Barrancas. La principal diferencia se presenta en la clase de menor permanencia, entre 32 a 79 días, por lo que la subcuenca del río Grande



**Figura 2.** Diagrama de la metodología utilizada para obtener información de cobertura nival a partir del producto MOD10A2. La información de entrada está representada en discos, las decisiones en rombos, los condicionantes en rectángulos y las series de datos generadas en paralelogramos. Las letras indican los pasos que se siguieron en la metodología que se describen en el texto.



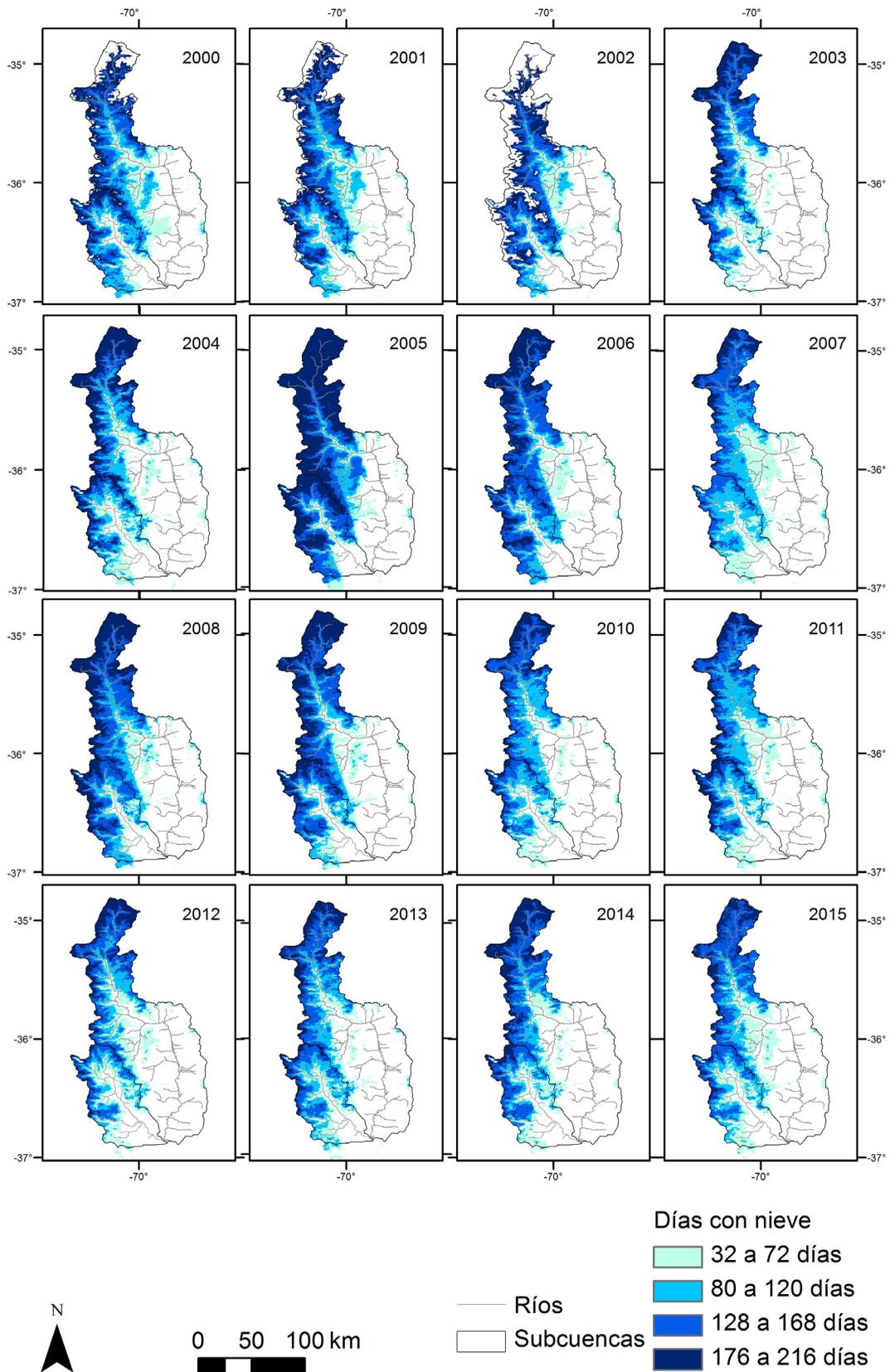
**Figura 3.** A) Cobertura de nieve en la subcuencas del río Grande y del río Barrancas desde el 23 de abril de 2000 a 17 de noviembre de 2015. B) Cobertura de nieve promedio por clases (días de permanencia) desde 2000 a 2015, y en las barras desvío estándar. Medias con letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

almacena mayor cantidad de nieve que permanece menos tiempo y estaría disponible más rápidamente para convertirse en escurrimiento superficial. En ambas subcuencas la clase entre 128 a 168 días es la que presenta menor variación entre años, con un desvío estándar de 333 km<sup>2</sup> para la subcuenca del río Grande y 223 km<sup>2</sup> para la subcuenca del río Barrancas. En cambio, la mayor variación de cobertura de nieve para el Grande se observa en la clase de 176 a 216 días con un desvío de 609 km<sup>2</sup> y para el Barrancas un desvío de 446 km<sup>2</sup> para la nieve que permanece entre 32 a 72 días. La cobertura de nieve con mayor permanencia resulta de suma importancia porque constituye el almacenamiento de agua en períodos estivales o en años secos.

Las subcuencas bajo estudio presentan diferencias en sus áreas de aporte en cuanto a elevación, pendiente,

orientación y tamaño (Aumassanne *et al.*, 2018), que se reflejan en diferencias en la dinámica de permanencia de la nieve y, en consecuencia, en su comportamiento hidrológico (figura 4). En ambas subcuencas sobre la región oeste y norte se ubica la nieve permanente (176 a 216 días) donde se presentan las mayores alturas (>2500 m s. n. m.), y sobre el centro y sur de ambas subcuencas la duración de la cobertura es más variable, donde se presentan alturas por debajo de los 1500 m s. n. m.

La altimetría es una variable determinante de la permanencia de nieve en la superficie, ya que por debajo de los 1500 m s. n. m. solo permanece la nieve hasta 72 días (figura 5A). La subcuenca del río Grande tiene una altitud media de 3945 m s. n. m., 159 metros superior a la subcuenca del río Barrancas (Aumassanne *et al.*, 2018), por



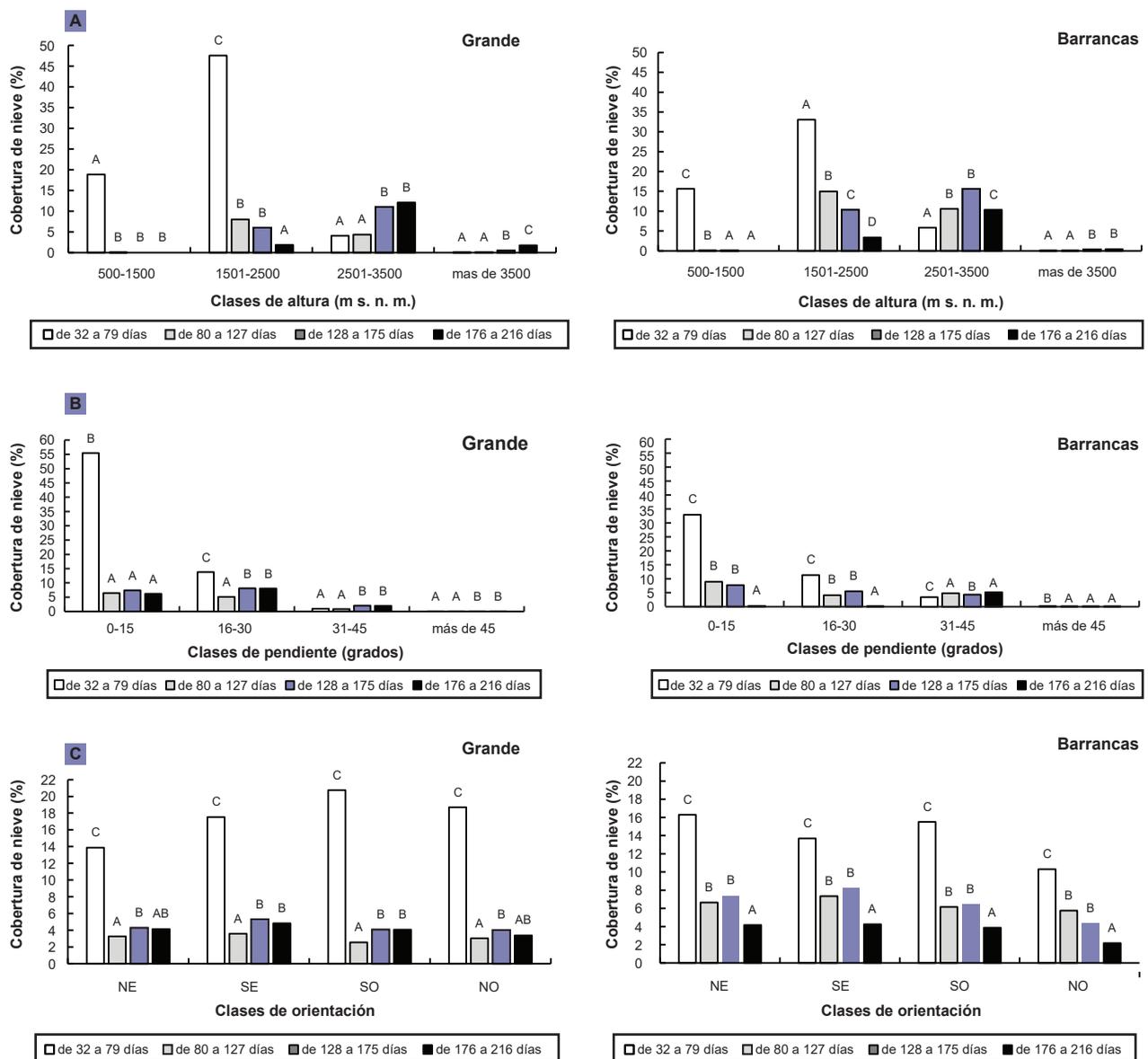
**Figura 4.** Mapas de frecuencia de cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado, derivados del producto MOD10A2, para los años 2000 a 2015 de abril a noviembre.

lo tanto, cuanto mayor es la altura media de una cuenca activa, la duración del almacenamiento se aproxima más al año entero, como sostienen Lascano y Villalba, (2007) ya que la persistencia temporal de la nieve depende de la altitud y de la latitud.

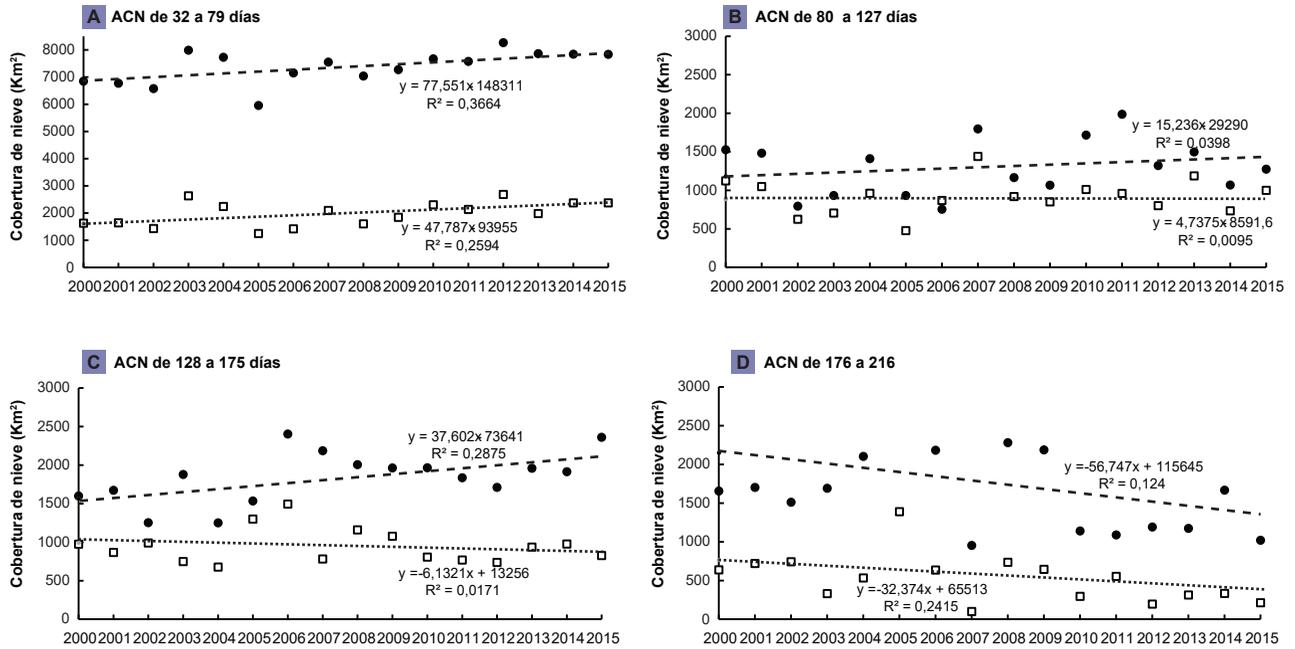
En ambas subcuencas, en las laderas con inclinación de 0 a 15° se ubica principalmente la cobertura de nieve de menor permanencia, así también en las laderas con inclinación de 16 a 30°. Por el contrario, las laderas con inclinación superior a 30° albergan escasa cobertura de nieve (figura 5B), existiendo diferencias significativas entre cla-

ses ( $p > 0,05$ ). En la subcuenca del río Barrancas un 13% de la superficie con nieve permanece entre 80 y 120 días en laderas muy inclinadas (más de 45°), a diferencia de la subcuenca del río Grande, donde en áreas de esas características la nieve prácticamente no permanece.

Con más de 80 días de permanencia, la nieve se ubica generalmente en laderas con orientación sureste en ambas subcuencas (figura 5C), existiendo diferencias significativas con las clases de orientación suroeste y noroeste ( $p > 0,05$ ). La cobertura de nieve con mayor permanencia se encuentra en sectores relacionados con la ubicación de glaciares,



**Figura 5.** A) Cobertura de nieve (%) en relación con la altura (m s. n. m.) para las distintas clases de permanencia, subcuenca del río Grande a la izquierda y del río subcuenca del río Barrancas a la derecha. B) Cobertura de nieve (%) en relación con la pendiente (grados) para las distintas clases de permanencia, subcuenca del río Grande a la izquierda y la subcuenca del río Barrancas a la derecha. C) Cobertura de nieve (%) en relación con la orientación para las distintas clases de permanencia, subcuenca del río Grande a la izquierda y la subcuenca del río Barrancas a la derecha (NE: noreste, SE: sudeste, SO: suroeste, NO: noroeste). En cada caso se representa el porcentaje de las cuencas cubiertos por nieve.



**Figura 6.** Área cubierta por nieve promedio (km<sup>2</sup>) por año para cada una de las clases de permanencia. Con círculos negros la subcuenca del río Grande y con cuadrados sin relleno la subcuenca del río Barrancas, y línea de tendencia en cada caso y ecuación de ajuste.

coincidentes con los sectores más elevados, protegidos y de menor insolación (Inventarios Nacional de Glaciares, 2018).

La mayor variabilidad de cobertura de nieve corresponde a la cobertura menos permanente y se presenta en zonas más bajas con pendientes menores a 15°. Al ser estas capas de menor espesor, ante aumentos de temperatura, es esperable que fluctúen más rápidamente. Según Ault *et al.* (2006) la fiabilidad del producto MOD10A2 es considerablemente más baja cuando la capa de nieve es delgada o se distribuye de forma discontinua; lo que podría estar ocurriendo en los sitios de nieve no permanente, o, dicho en otras palabras, con mayores variaciones de cobertura, que corresponden con las zonas más bajas de las subcuencas bajo estudio.

En la serie de años analizada la cobertura de nieve con menor permanencia tuvo una tendencia positiva en ambas subcuencas (figura 6 A y 6 B), por lo tanto, la nieve tiene menor duración como reserva de agua y se convertiría rápidamente en escurrimiento superficial. En cambio, la cobertura de nieve de mayor permanencia ha disminuido en los últimos años, con una tendencia negativa más acentuada en la subcuenca del Grande (figura 6 D), de esta forma las reservas de agua de un año a otro estarían disminuyendo.

Si bien el promedio general del área cubierta por nieve se mantuvo en valores similares, la región bajo estudio experimentó una disminución en la permanencia de la cubierta de nieve durante la última década, con una tendencia negativa en el período 2000-2015.

Según estimaciones de modelos, Boninsegna (2014) sostiene que la posición de la isoterma 0 °C determina la

disminución de la superficie de acumulación de nieve en el invierno y de la superficie que permite la permanencia de nieve en el verano. Las cuencas más afectadas serían las cuencas ubicadas hacia el sur de la región cuyana por ser las cuencas más bajas, en las cuales la disminución de las superficies mencionadas alcanza a porcentajes entre 75 y 80% para fines de este siglo con respecto a las superficies actuales. Una consecuencia sería la desaparición paulatina de los glaciares por elevación de la línea de 0 °C y disminución de las precipitaciones, con la pérdida de la capacidad reguladora y de la reserva de agua que estos poseen. La elevación de la línea de 0 °C en el invierno implicaría la exposición de las superficies que en la actualidad están en forma permanente o casi permanentemente congeladas con riesgo de pérdida de estabilidad y aumento de movimientos en masa. El incremento en la atmósfera de los gases de efecto invernadero, al que se le atribuyen los cambios recientes del clima, está alterando el funcionamiento de la Cordillera de los Andes como “torre captadora” al aumentar las temperaturas y modificar la cantidad y distribución estacional de las precipitaciones (Boninsegna *et al.*, 2015).

### CONCLUSIONES

En cuencas de grandes extensiones e inaccesibles para la toma de datos sobre todo en invierno y en primavera, como es el caso de los subcuencas bajo estudio, las de los ríos Grande y Barrancas, la información derivada de sensores remotos es una importante herramienta disponible para el seguimiento de la cobertura de nieve. La determi-

nación del área cubierta de nieve es particularmente importante a fines de invierno principios de primavera, momento de máxima cobertura y posterior comienzo del período de fusión aportando a los arroyos y ríos de la cuenca. Los resultados brindan información novedosa y relevante para conocer y entender de forma más completa la distribución espacial y variabilidad temporal de la cobertura nival en las subcuencas del Grande y Barrancas, y servirían de base para múltiples aplicaciones incluyendo el modelado hidrológico de la cuenca del río Colorado. Este trabajo constituye el primer análisis de cobertura de nieve durante 16 años para la cuenca alta del río Colorado.

La combinación de la altitud, pendiente y orientación con la superficie y permanencia de nieve permite comprender la variación espacial del área cubierta de nieve en la cuenca alta del río Colorado. Los resultados revelan la distribución regional de la nieve, los gradientes de altitud de la acumulación de nieve y las variaciones de su distribución en diferentes años, siendo el año 2005 el de mayor cobertura de nieve. La altura, seguido por la pendiente, representa los factores que más influyen en la permanencia de la nieve.

Este modelo constituye una herramienta sencilla y práctica para el seguimiento espacial y temporal de la cobertura de nieve en tiempo real, que, si bien no tiene en cuenta el espesor de nieve ni la densidad, la cobertura cuantificada está asociada al derrame anual del río, sirviendo de base para la planificación y manejo integral del recurso hídrico. La metodología y análisis empleados pueden ser repetidos y extendidos a cuencas similares, con costos de tiempo y operacionales relativamente bajos.

Además, mediante el uso de esta información (área cubierta de nieve, datos de elevación, pendiente y orientación) se contribuye a seleccionar puntos estratégicos para la ubicación de mediciones complementarias, que permitirán la implementación de modelos hidrológicos más precisos favoreciendo a un mejor pronóstico de los volúmenes escurridos y a una mejor gestión en el uso del recurso hídrico.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANDREADIS, K.M.; LETTENMAIER, D.P. 2006. Assimilating remotely sensed snow observations into a macroscale hydrology model. *Advances in Water Resources* 29 (6), 872-886.
- AUMASSANNE, C.M.; BEGET, M.E.; GASPARI, F.J.; DI BELLA, C.M.; ORICCHIO, P.; SARTOR, P.D. 2018. Morfometría de la cuenca alta del río Colorado: descripción a partir de un modelo digital de elevación. Enviado a Boletín Geográfico Universidad Nacional del Comahue.
- BAUMGARTNER, M.F.; SEIDEL, K.; MARTINEC, J. 1987. Towards snowmelt runoff forecast based on multisensor remote sensing information. *IEEE Trans, on Geoscience and Remote Sensing GE-2S*, 746-75.
- BONINSEGNA, J. 2014. Impacto del cambio climático en los oasis del oeste argentino. *Ciencia e investigación*. Tomo 64 N.º1. (Disponible: [http://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/4849/p45-58-64-1-2014-5\\_1\\_.pdf?sequence=1&isAllowed=n&date=5000-01-01](http://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/4849/p45-58-64-1-2014-5_1_.pdf?sequence=1&isAllowed=n&date=5000-01-01) verificado: 21 de agosto de 2016).
- BONINSEGNA, J.; LLOP, A. 2015. Impactos y vulnerabilidad al cambio climático de los principales ríos de Mendoza y San Juan a partir de la evolución de los glaciares cordilleranos. *La economía del cambio climático en la Argentina*. CEPAL. Serie Medio Ambiente y Desarrollo N.º 161.
- BONINSEGNA, J.; VILLALBA, R.; URRUTIA, R. 2015. El cambio climático y los servicios del agua en la Cordillera de los Andes. En: LARA, A.; LATERRA, P.; MANSON, R.; BARRANTES, G. (Eds.). *Servicios ecosistémicos hídricos: estudios de caso en América Latina y el Caribe*. Red Pro Agua y Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. 263-278 pp.
- CARA, L.; MASIOKAS, M.; VIALE, M.; VILLALBA, R. 2016. Análisis de la cobertura nival de la cuenca superior del río Mendoza a partir de imágenes MODIS. *Meteorológica* 41, 21-36.
- CARTES, M.A. 2009. Pronóstico de volúmenes de deshielos mediante redes neuronales recurrentes e imágenes satelitales MODIS. Tesis Ms. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento De Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago de Chile. (Disponible: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102115> verificado: 01 de marzo de 2017).
- COGLIATI, M.G.; GROCH, D.; FINESSI, F. 2015. Utilización de productos MOD10A1 para el estudio de la variabilidad de cobertura de nieve en la Cordillera del Viento (Neuquén, Argentina). vii Congreso Argentino de Tecnología Espacial. Buenos Aires, Argentina. (Disponible: [https://www.researchgate.net/publication/278394927\\_UTILIZACION\\_DE\\_PRODUCTOS\\_MOD10A1\\_PARA\\_EL\\_ESTUDIO\\_DE\\_LA\\_VARIABILIDAD\\_DE\\_COBERTURA\\_DE\\_NIEVE\\_EN\\_LA\\_CORDILLERA\\_DEL\\_VIENTO\\_NEUQUEN\\_ARGENTINA](https://www.researchgate.net/publication/278394927_UTILIZACION_DE_PRODUCTOS_MOD10A1_PARA_EL_ESTUDIO_DE_LA_VARIABILIDAD_DE_COBERTURA_DE_NIEVE_EN_LA_CORDILLERA_DEL_VIENTO_NEUQUEN_ARGENTINA) verificado: 15 de marzo de 2017).
- COIRCO (COMITÉ INTERJURISDICCIONAL DEL RÍO COLORADO). 2013. Programa Integral de Calidad de Aguas del Río Colorado – Calidad del Medio Acuático. Informe Técnico. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado, Secretaría de Energía de la Nación, Grupo Interempresario. (Disponible: [www.coirco.com.ar](http://www.coirco.com.ar) verificado: 14 de diciembre de 2016).
- DAHRI, Z.H.; AHMAD, B.; LEACH, J.H.; AHMAD, S. 2011. Satellite-Based Snowcover Distribution and Associated Snowmelt Runoff Modeling in Swat River Basin of Pakistan. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences*, 48 (1), 19-32.
- EHLER, C.; SEIDEL, K.; MARTINECA, J. 1997. Advanced analysis of snow cover based on satellite remote sensing for the assessment of water resources. *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*, 242, 93-101.
- HALL, D.K.; RIGGS, G.A.; SALOMONSON, V.V. 2001. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms. (Disponible: [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod10.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod10.pdf) verificado: 20 de mayo de 2015).
- HALL, D.K.; RIGGS, G.A.; SALOMONSON, V.V. 2006. MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m. Version 5. Boulder, Colorado, EUA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. (Disponible: <http://sci-hub.tw/10.5067/ACytyzB9BEOS> verificado: 25 de mayo de 2015).
- HANTEL, M.; EHRENDORFER, M.; HASLINGER, A. 2000. Climate sensitivity of snow cover in Austria. *International Journal of Climatology* 20, 615-640.
- HERMS, I.; JORGE, J. 2012. Variación anual e interanual del manto nivoso en el Port del Compte-Serra del Cadí a partir de imágenes MODIS. xv Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Madrid.
- INVENTARIO NACIONAL DE GLACIARES. 2018. Informe de la subcuenca del río Grande (sectores norte y sur) Cuenca del Río Colorado. Provincia de Mendoza. (Disponible: [http://www.glaciare-sargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/provincias/Mendoza/docs/informes/informe\\_final\\_grande\\_APN\\_24-04-2018.pdf](http://www.glaciare-sargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/provincias/Mendoza/docs/informes/informe_final_grande_APN_24-04-2018.pdf) verificado: 05 de mayo de 2018).

- LASCANO, M.E.; VELASCO, I. 2007. Estimación de cobertura de nieve en los Andes Centrales con datos NOAA-AVHRR. Cuenca de los ríos Colorado y Neuquén. (Disponible: [www.infraestructura.com.ar](http://www.infraestructura.com.ar) verificado: 02 de abril de 2016).
- LASCANO, M.E.; VILLALBA, R. 2007. Algunas precisiones sobre el rol de los glaciares en el escurrimiento andino. CONAGUA 2007. Tucumán. (Disponible: [www.infraestructura.co.nr](http://www.infraestructura.co.nr) verificado: 05 de mayo de 2016).
- MASIOKAS, M.H.; VILLALBA, R.; LUCKMAN, B.H.; LE QUESNE, C.; ARAVENA, J.C. 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, 6334-6352.
- MASIOKAS, M.H.; VILLALBA, R.; LUCKMAN, B.H.; MONTAÑA, E.; BETMAN, E.; CHRISTIE, D.; LE QUESNE, C.; MAUGET, S. 2013. Recent and Historic Andean Snowpack and Streamflow Variations and Vulnerability to Water Shortages in Central-Western Argentina. *Climate Vulnerability* 5, 213-227 pp.
- MARTINEC, J.; SEIDEL, K.; BURKART, U.; BAUMANN, R. 1991. Areal modelling of snow water equivalent based on remote sensing techniques. xx General Assembly IUGG in Vienna 1991, IAHS-IUFRO Symposium Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas, 205, 121-129.
- MHAWAJ, M.; FAOUR, G.; FAYAD, A.; SHABAN, A. 2014. Towards an enhanced method to map snow cover areas and derive snow-water equivalent in Lebanon. *Journal of Hydrology* 513, 274-282.
- PAUDEL, K.P.; ANDERSEN, P. 2011. Monitoring snow cover variability in an agropastoral area in the Trans Himalayan region of Nepal using MODIS data with improved cloud removal methodology. *Remote Sensing of Environment* 115, 1234-1246.
- SALCEDO, A. P. 2011. Estimación de área cubierta de nieve en cuencas con elevado aporte de fusión utilizando datos ERS-2. Tesis de posgrado Magister en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias. Universidad Nacional de Córdoba la Facultad de Matemática, Astronomía y Física y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich. 103 p.
- SLOAN, W.T.; KILSBY, C.G.; LUNN, R. 2004. Incorporating topographic variability into a simple regional snowmelt model. *Hydrological Processes* 18, 3371-3390.
- SUBSECRETARÍA DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL DE LA INVERSIÓN PÚBLICA Y COMITÉ INTERJURISDICCIONAL DEL RÍO COLORADO. 2013. Diagnóstico integrado y escenarios de futuro de la región y la cuenca del río Colorado. 238 p. (Disponible: <http://scripts.minplan.gob.ar/octopus/archivos.php?file=2656> verificado: 20 de mayo de 2016).
- STEHR, A.; DEBELS, P.; ARUMI, J.L.; ROMERO, F.; ALCA-YAGA, H. 2009. Combining the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and MODIS imagery to estimate monthly flows in a data-scarce Chilean Andean basin. *Hydrological Sciences Journal*. 54 (6), 1053-1067.
- TAHIR, A.A.; CHEVALLIER, P.; ARNAUD, Y.; ASHRAF, M.; BHATTI, M.T. 2015. Snow cover trend and hydrological characteristics of the Astore River basin (Western Himalayas) and its comparison to the Hunza basin (Karakoram region). *Science of the Total Environment* 505, 748-761.
- TEKELI, A.E.; AKYÜREK, Z.; SORMAN, A.A.; SENSOY, A.; SORMAN, A. U. 2005. Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey. *Remote Sensing of Environment* 97, 216-230.
- TELESCA, L.; SHABAN, A.; GASCOIN, S.; DARWICH, T.; DRAPEAU, L.; HAGE, M. E.; FAOUR, G. 2014. Characterization of the time dynamics of monthly satellite snow cover data on Mountain Chains in Lebanon. *Journal of Hydrology* 519, 3214-3222.
- TRIPODI, D.; FERNÁNDEZ, B. 2000. Cobertura nival y enos en el pronóstico de caudales en cuencas de montaña. *Ingeniería del Agua* 7 (2), 117-127.
- WALTERS, R.D.; WATSON, K.A.; MARSHALL, H.P.; MCNAMARA, J.P.; FLORES, A.N. 2014. A physiographic approach to downscaling fractional snow cover data in mountainous regions. *Remote Sensing of Environment* 152, 413-425.
- WANG, X.; XIE, H.; LIANG, T. 2008. Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its applications in northern Xinjiang, China. *Remote Sensing of Environment* 112(4), 1497-1513.