

DINÁMICA ANUAL E INTERANUAL DE LA COBERTURA DE NIEVE EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO COLORADO (ARGENTINA) Y SU RELACIÓN CON EL CAUDAL

Carolina Aumassanne¹, María Eugenia Beget^{2,4}, Patricio Oricchio², Carlos Marcelo Di Bella^{3,4},
Fernanda Julia Gaspari⁵, Francisco Babinec^{6,7}.

¹Agencia de Extensión Rural INTA 25 de Mayo, La Pampa, Argentina;

²Instituto de Clima y Agua de INTA Castelar, Buenos Aires, Argentina;

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET);

⁴Departamento de Métodos Cuantitativos- Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina;

⁵Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina;

⁶Estación Experimental Agropecuaria Anguil, La Pampa, Argentina;

⁷Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa, Argentina.

(Manuscrito recibido el 19 de enero de 2021, en su versión final el 19 de octubre de 2021)

RESUMEN

Estudiar las variaciones temporales y espaciales de la cobertura de nieve resulta sumamente importante para la planificación y manejo de las cuencas de régimen nival. En este trabajo se utilizó el producto MOD10A2 con el objetivo de evaluar el área cubierta por nieve y su variación temporal en la cuenca alta del río Colorado desde 2000 a 2018. Se calculó y analizó la superficie cubierta por nieve durante los 19 años de análisis y se estudiaron los atributos de la acumulación de nieve (fechas promedio y más frecuentes de comienzo, máximo, final y rango relativo). Además, se clasificaron las curvas de evolución temporal en años con: *i*) fusión más lenta que la acumulación; *ii*) doble punto de máxima acumulación; y *iii*) acumulación más lenta que la fusión. La superficie máxima cubierta por nieve fue de 13.316 km² en junio de 2018 representando casi el 96% del área de la cuenca, seguido por julio de 2017 (13.281 km²) y la mínima de 15 km² en febrero de 2011. En promedio, la acumulación de nieve comienza la semana del 15 de marzo y el máximo ocurre durante la semana del 23 de julio. Este análisis representa la serie de tiempo más larga de información de cobertura de nieve estimada mediante información satelital para la cuenca del Colorado. En un contexto de variabilidad y cambio climático, el uso de esta información constituye una valiosa herramienta para el monitoreo de la nieve de forma periódica, en tiempo real, en grandes extensiones de baja accesibilidad.

Palabras clave: teledetección, planificación y gestión de cuencas.

DINÁMICA ANUAL E INTERANUAL DE LA COBERTURA DE NIEVE EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO COLORADO (ARGENTINA) Y SU RELACIÓN CON EL CAUDAL

ABSTRACT

Studying the temporal and spatial variations of snow cover is extremely important for the planning and management of snow basins. The MOD10A2 product was used to evaluate the area covered by snow and its temporal variation in the upper Colorado river basin from 2000 to 2018. Snow covered area and snow accumulation attributes (average and most frequent dates of beginning, end and relative range) were calculated and analyzed during the 19 years of analysis. In addition, temporal evolutions were classified by years with: *i*) fusion slower than accumulation; *ii*) double point of maximum accumulation; and *iii*) accumulation slower than fusion. The maximum snow covered area was 13.316 km² in June 2018, representing almost 96 % of total basin area, followed by July 2017 (13.281 km²) and the minimum of 15 km² in February 2011. On average, snow accumulation begins on the week of March 15 and the maximum occurs on the week of July 23. This analysis represents the longest set of snowfall information estimated using satellite information for the Colorado basin. In context of climatic variability, the use of this information constitutes a valuable tool for monitoring snow periodically, in real time and in large areas of low accessibility.

Keywords: remote sensing, planning and watershed management.

1. INTRODUCCIÓN

En cuencas de montaña, el estudio del patrón y la extensión de la cubierta de nieve es importante para comprender el impacto local y regional del cambio climático (e.g. Xu *et al.*, 2008). Las variaciones en la ocurrencia de nevadas, principal aporte de agua a la escorrentía total de estos ríos de montaña, afectan la hidrología de una cuenca nival de manera significativa. En este caso, la hidrología de la nieve se enfoca en el estudio de los procesos físicos que caracterizan la variabilidad espacio temporal y la condición del manto nival, mientras que la dinámica de la cobertura anual de nieve es producto de las condiciones climatológicas (precipitación, temperatura, viento). A su vez, las condiciones morfológicas de la cuenca, tales como tamaño, elevación, pendiente y orientación, también cumplen un papel determinante en dicha dinámica (Aumassanne *et al.*, 2018). Existen estudios que revelan la distribución regional de la nieve, los gradientes de altitud de la acumulación de nieve y las variaciones de su distribución en la superficie en el tiempo (inter e intra-anual), permitiendo identificar sectores de almacenamiento de nieve e identificar áreas

más o menos vulnerables frente a escenarios climáticos (e.g. Aumassanne, 2019).

La evolución del manto nival presenta una periodicidad anual caracterizada por la acumulación de la precipitación en forma de nieve durante los meses de otoño-invierno, y su posterior derretimiento y generación de escorrentía de deshielo, que predomina en primavera-verano. Este ciclo anual se encuentra modulado por la variabilidad atmosférica y, en especial, por la variación latitudinal del Anticiclón del Pacífico Sur (PSA) (e.g. Boninsegna y Llop, 2015) y del cinturón de los oestes. Por otro lado, las variaciones interanuales de la precipitación, están relacionadas a fenómenos de circulación atmosférica y, en particular, al forzante conocido como El Niño – Oscilación del Sur (ENSO). Durante los años El Niño, con anomalías de temperatura positivas en el Pacífico Ecuatorial, la precipitación suele ser mayor que el promedio en la región, mientras que durante los años La Niña se presentan temperaturas por debajo de lo normal en el Pacífico Ecuatorial y la precipitación se ubica por debajo de los valores medios (Boninsegna y Delgado, 2002). En Argentina, particularmente

en las cuencas cuyanas, la influencia de los forzantes climáticos como el ENSO, el PSA y el Monzón Sudamericano regulan la cantidad y el momento de ocurrencia de las precipitaciones níveas generando importante variabilidad interanual en las mismas (Boninsegna y Llop, 2015).

El régimen hídrico de las cuencas del centro oeste de Argentina es esencialmente pluvio-nival y, en consecuencia, fuertemente dependiente de la cantidad de nieve que precipita durante el invierno y se acumula en las altas cuencas (Boninsegna y Llop, 2015). Existe una alta relación entre la cantidad de nieve caída durante la estación invernal con los caudales emergentes del período estival (Masiokas et al., 2006). Tanto los ríos cuyanos como los patagónicos se caracterizan por la gran variabilidad interanual de sus caudales debido a su gran dependencia de las fluctuaciones climáticas reinantes en la región, con la consecuente repercusión en la economía regional y nacional (Campagnucci, 2007). De esta manera, la cuantificación de la extensión de la capa de nieve y el monitoreo de la dinámica temporal anual e interanual resultan esenciales para la gestión del agua en dichas cuencas. Sin embargo, mediante el uso de estaciones meteorológicas y nivológicas se obtienen datos puntuales en el tiempo y en el espacio (Lascano y Velasco, 2007) que resultan insuficientes por el tamaño de las cuencas. Además, las estaciones de terreno requieren de mantenimiento y control, presentando limitantes debido a la difícil accesibilidad en otoño-invierno.

La teledetección, definida como la observación a distancia de los objetos, permite estudiar los usos y coberturas de la tierra, el tipo de vegetación (e.g. Noretto et al., 2012), los cuerpos de agua y la cobertura de nieve (Salomonson y Appel, 2004; Cartes, 2009; Dahri et al., 2011; Herms y Jorge, 2012), entre otros. En este contexto, la información derivada de sensores remotos permite el seguimiento de grandes extensiones de territorio de forma permanente, objetiva, económica y en tiempo

real; lo cual hace posible el estudio de series temporales, facilitando la caracterización intra anual e interanual de la cobertura de nieve (e.g. Aumassanne et al., 2019). La detección de la cobertura nival a partir de sensores remotos satelitales como MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) es posible debido a la alta reflectancia espectral de la nieve en la porción visible del espectro electromagnético y una baja reflectancia en el infrarrojo cercano. Particularmente, el producto MOD10A2 fue ampliamente utilizado debido a su alta resolución temporal (Hall et al., 2001; 2006). Por ejemplo, estudios de Paudel y Andersen (2011), Telesca et al. (2014), Tahir et al. (2015) y Thapa y Muhammad (2020), entre otros, han evaluado la variabilidad temporal del área cubierta por nieve y la precisión de las estimaciones realizadas por MODIS. En Argentina, trabajos similares se llevaron a cabo por Cogliati et al. (2015) para la cuenca alta del río Neuquén y por Cara et al. (2016) para la cuenca superior del río Mendoza. Sin embargo, no existen investigaciones sobre la dinámica y acumulación de la cobertura de nieve para la cuenca del río Colorado. De esta manera, el objetivo de este trabajo es evaluar el área cubierta por nieve y su variación temporal (anual e interanual) en la cuenca alta del río Colorado, Argentina, y su relación con el derrame, en el período de 2000 a 2018. Al investigar la variación temporal y la distribución espacial de la cobertura de nieve se comprende el funcionamiento del sistema hidrológico, que resulta elemental para la planificación y manejo de las cuencas nivales. El área de estudio constituye la única fuente de agua para el desarrollo de la mayor parte de las actividades agrícolas, industriales y urbanas de una vasta región árida y semiárida de cinco provincias argentinas que componen la cuenca. Por lo tanto, estudiar las entradas del ciclo hidrológico es de interés regional y nacional para el manejo sustentable de los recursos hídricos en los Andes semiáridos de la República Argentina.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica en zonas de alta cordillera de Los Andes, entre los $34,48^\circ$ y $36,53^\circ$ de latitud sur, y está conformada por las cuencas de los ríos Grande y Barrancas, los principales afluentes del río Colorado, que recorre 1200 km atravesando parte de las provincias de Mendoza, Neuquén, Río Negro, La Pampa y Buenos Aires. El derrame anual del río Colorado es de 4600 Hm^3 y el caudal medio anual de $138,8 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$, con una marcada estacionalidad primavero-estival (Figura 1 B) (COIRCO, 2013). El Colorado es el que mayor caudal presenta en comparación con otros ríos de régimen similar de cuencas cuyanas como los ríos San Juan ($59,4 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$), Mendoza ($45,9 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$), Tunuyán ($28,7 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$), Diamante ($34,2 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$) y Atuel ($34,6 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$), según Lauro et al. (2016). Sin embargo, presenta menor caudal que los ríos Neuquén ($280 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$), Negro ($930 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$) y Limay ($650 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$), ubicados al sur del área de estudio. La superficie bajo estudio ocupa aproximadamente 13.900 km^2 (29% de la superficie total de la cuenca) y corresponde a la cuenca hidrológica activa donde se producen los mayores aportes de agua (Figura 1 A). Aquí, durante los meses invernales, se produce la mayor cantidad de precipitaciones en forma de nieve. Al comienzo de la primavera y durante la estación cálida, la nieve acumulada se derrite aumentando el caudal del río Colorado y determinando un hidrograma unimodal con máximo en los meses de noviembre y diciembre (COIRCO, 2013). El río Grande tiene alimentación nival exclusivamente, mientras que el Barrancas es una cuenca de transición entre las hoyas nivales al norte y pluvio-nivales del sur (Inventario Nacional de Glaciares, 2018). La subcuenca del Grande se encuentra en una zona de transición entre la región cuyana seca y la patagónica húmeda, donde el aporte nival y pluvial es más importante debido a que la Cordillera es más baja, permitiendo el ingreso de aire húmedo del Pacífico (Halcrow, 2013).

En esta subcuenca el 0,6% de su superficie está cubierta por glaciares (Inventario Nacional de Glaciares, 2018). El aporte hídrico de los glaciares existentes en la cuenca alta del río Colorado 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).

En el área de estudio el clima es frío, con una temperatura media anual que no supera los 10°C y las precipitaciones fluctúan entre los 600 y 1000 mm (en promedio) concentradas en la época invernal. En esta zona dominan, especialmente hacia el oeste, los paisajes irregulares compuestos por valles profundos, elevados cordones montañosos sobre los que se imponen volcanes y, de manera subordinada hacia el oriente, serranías más bajas en las cuales se observa un severo control estructural en el diseño de los sistemas fluviales y las formas del relieve (Halcrow, 2013).

2.2. Fuente de datos

Se utilizó el producto satelital MOD10A2 del sensor MODIS para estimar la extensión máxima de la cubierta de nieve cada 8 días (Hall *et al.*, 2001 ; 2006). El mismo cuenta con una resolución espacial de 500 metros para el período de enero de 2000 a diciembre de 2018 (<https://nsidc.org/data/mod10a2>). El valor de píxel indica de manera cualitativa la presencia o ausencia de nieve, con los posibles valores 0 nada, 25 dudoso, 50 nube y 200 nieve. La presencia de nieve en un píxel es registrada cuando, para al menos uno de los 8 días, se detecta nieve. La capa de nieve en este conjunto de datos se deriva del índice de nieve de diferencia normalizada (NDSI). La tierra cubierta de nieve típicamente tiene una reflectancia muy alta en bandas visibles y muy baja reflectancia en el infrarrojo de onda corta; el NDSI revela la magnitud de esta diferencia. El algoritmo lee ocho días de mosaicos MOD10A2 y si encuentra cobertura de nieve con un valor de NDSI ≥ 10 en una celda para cualquier día

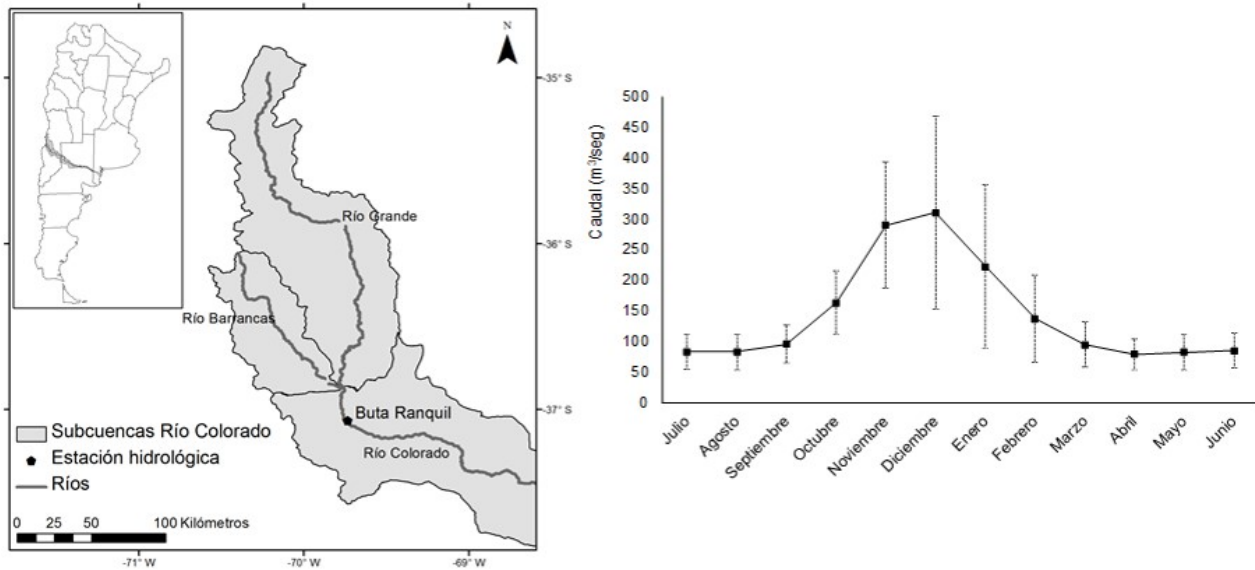


Figura 1: A) Localización de la cuenca alta del río Colorado, B) Caudal medio mensual ($m^3 \cdot seg$) ± 1 desvío estándar en la estación Buta Ranquil (Neuquén) para el período 1940-2016. Fuente: Base de Datos Hidrológica Integrada de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de Nación.

del período, la celda se mapea como nieve en la banda $MaximumSnowExtent$. La escena analizada correspondió a la denominada h12v12 para los años 2000 a 2018 con un total de 45 imágenes por año, que suman 855 imágenes en toda la serie. La escena abarca un área de $1200 \times 1200 \text{ km}^2$, de la cual se extrajo únicamente el área perteneciente a la cuenca alta del río Colorado.

Los caudales medios mensuales para la serie desde enero de 2000 a diciembre de 2018 de la estación Buta Ranquil, Neuquén (Figura 1 A) fueron obtenidos de la Base de Datos Hidrológica Integrada perteneciente a la Subsecretaría de Recursos Hídricos (<http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/>). Los datos obtenidos corresponden a caudales medios diarios ($m^3 \cdot seg^{-1}$) y luego se calcularon los valores medios mensuales para toda la serie. Además, se calculó el derrame anual (Hm^3) para cada uno de los años de serie y posteriormente se correlacionó el derrame anual del río Colorado en la estación Buta Ranquil (Neuquén) para la serie temporal con el promedio de cobertura de nieve para cada año.

2.3. Análisis de los datos

Para obtener información de la cobertura de nieve se identificaron los píxeles con nieve descartando el resto de píxeles (nube, dudoso, sin dato) en cada imagen para el período bajo análisis. Se estimó la cantidad de píxeles con nubes en cada fecha. En 13 fechas de toda la serie se obtuvo un porcentaje igual o superior al 20% de píxeles con nube en toda la escena, que representa el 2,8% de las imágenes analizadas, por lo cual no se consideraron píxeles con valor correspondiente a nube ni se descartaron imágenes. Luego, se calculó y analizó la superficie cubierta por nieve para cada una de las fechas durante los 19 años de análisis. Para el análisis estadístico descriptivo se obtuvo el promedio mensual, máximos, mínimos y sus variaciones para cada año. Por otra parte, se estudiaron los atributos de la acumulación de nieve (fechas promedio y más frecuentes de comienzo, máximo, final, rango relativo, acumulado anual) y fusión (Figura 2). En función de los períodos entre cobertura mínima inicial-máxima y, máxima-mínima final se analizaron los patrones de dinámica de la superficie cubierta por nieve. Posteriormente,

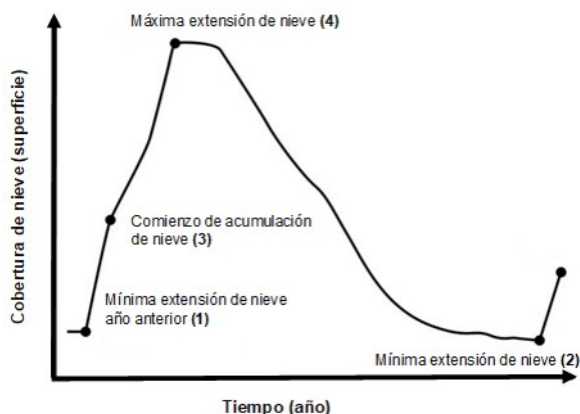


Figura 2: Modelo del ciclo anual de la nieve. Los números entre paréntesis indican los parámetros de la dinámica anual de cobertura de nieve. Tabla 1. Adaptado de Paudel *et al.* 2011

se relacionó el caudal y la cobertura de nieve promedios mensuales mediante una prueba paramétrica. Para ello, se centraron y escalaron los datos de ambas variables de manera tal que las series puedan ser comparables. Además, se realizó un ajuste mediante una tendencia lineal común y se evaluó la pendiente de las curvas de tendencia de cada una de las variables.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El área promedio cubierta por nieve durante los 19 años de análisis fue de 3875 km² (\pm 3477,57 km²), que equivale a 29% de la superficie de la cuenca alta del río Colorado, precisamente a las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas. El porcentaje promedio de cobertura de nieve osciló entre el 30 y el 97% del área total en invierno y de 0,1 a 18% de la superficie en verano, debido a que la precipitación en la Cordillera es sumamente escasa en esta estación del año. La superficie máxima cubierta por nieve fue de 13.316 km² en junio de 2018 (97% de la superficie), seguido por julio de 2017 (13.281 km²) y la mínima de 13 km² en enero de 2014 con una superficie de 0,1%. Los resultados encontrados en este trabajo reafirman la presencia de una marcada variabilidad interanual modulada en gran parte

por la ocurrencia de los forzantes climáticos mencionados (Boninsegna y Llop, 2015).

Respecto al ciclo anual de la cobertura de nieve, el período de acumulación de nieve se inició en marzo-abril, con máximos en julio, agosto y septiembre, y reducciones de la cobertura en los meses de primavera y verano (octubre-febrero) donde predominó el proceso de fusión (Figura 3). El período de deshielo comenzó a principios de septiembre y el mínimo de nieve se observó durante enero y febrero cuando la cobertura de nieve alcanzó un rango de 0,1-16% de la superficie cubierta (Figura 3 y 4). Existen algunas nevadas tempranas a principios de febrero, pero el inicio de acumulación de nieve tiene como fecha promedio la semana del 15 de marzo, y más frecuente la primera semana de marzo (Figura 3, Tabla I). Por otra parte, la fecha más frecuente de máxima acumulación en los 19 años de análisis fue la semana del 12 de julio. Desde 2006 a 2014 se observó una evidente disminución de las nevadas ya que la cobertura máxima desarrollada sobre la cuenca alta del río Colorado no ha superado el máximo del promedio de la serie (10.402 km²). Además, desde 2008 a 2016, la cobertura de nieve mínima no superó el promedio de la serie (82,7 km²), evidenciando que la reserva de agua en nieve que se transfiere de un año a otro disminuyó durante los últimos años (Tabla I).

La mayor variabilidad en la superficie cubierta por nieve ocurre en los meses de mayo y junio, meses con el mayor desvío estándar (1704 km² y 1726 km², respectivamente), y meses en los que comienzan las nevadas, lo cual indica que el comienzo de la temporada de nieve varía anualmente. La cobertura de nieve en los meses de primavera-verano es menos variable entre años. A partir de esta variabilidad, se clasificaron las curvas de evolución intra-anual de la superficie cubierta por nieve de todos los años bajo análisis (Figura 4 A). En este sentido, se detectaron diferentes patrones según si: *i*) la acumulación de nieve fue un proceso más lento que la fusión en los años 2001, 2004, 2007, 2010, 2011, 2013 y 2015; *ii*) existieron

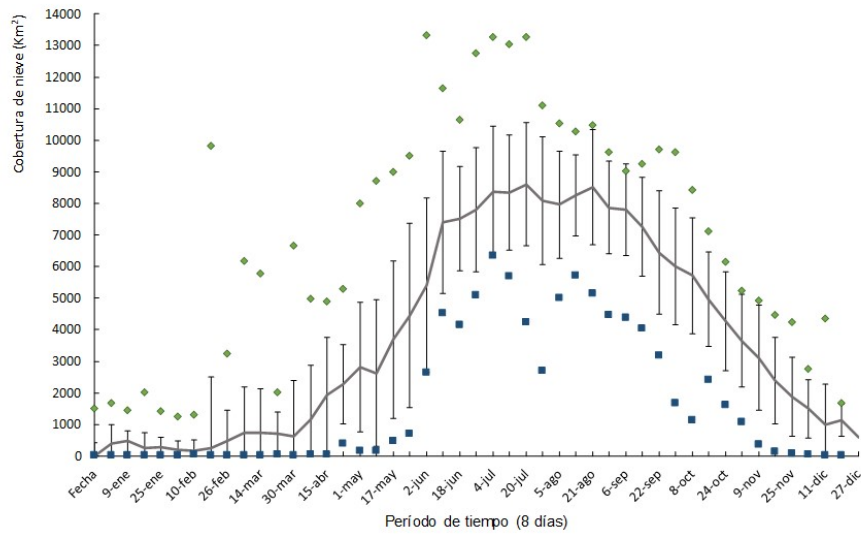


Figura 3: Distribución de la cubierta de nieve cada 8 días (promedio \pm 1 desviación estándar en barras) estimada desde 2000 a 2018. Los valores máximos se representan en rombos color verde y los valores mínimos en cuadrados de color azul.

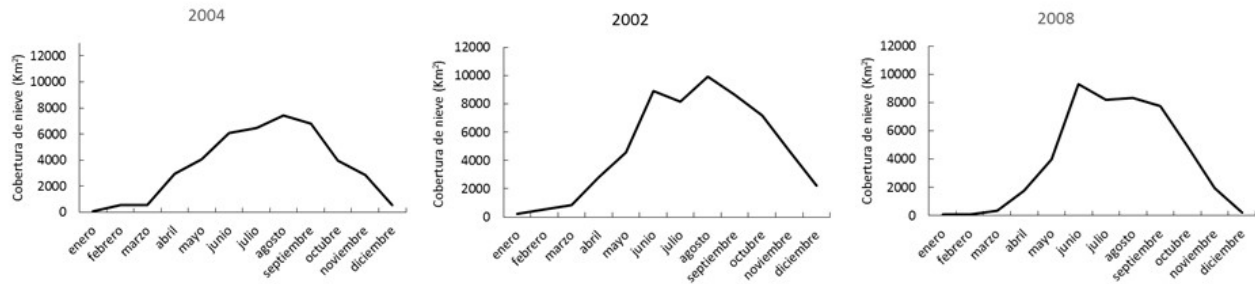
Año	Cobertura mínima (año anterior) (1)		Cobertura mínima del año (2)		Inicio de acumulación (3)	Cobertura máxima (4)		Período de predominio de acumulación (4-1)		Período de predominio de fusión (2-4)	
	Fecha	Superficie (km ²)	Fecha	Superficie (km ²)	Fecha	Fecha	Superficie (km ²)	Días	Superficie (km ²)	Días	Superficie (km ²)
2000	6-mar	74	27-dic	990	23-abr	12-jul	12.478	128	12404	168	11488
2001	18-feb	55	27-dic	300	22-mar	5-ago	10.992	168	10937	144	10692
2002	10-feb	93	27-dic	1056	26-feb	5-ago	11.113	176	11020	144	10057
2003	2-feb	230	19-dic	95	30-mar	12-jul	9292	160	9062	160	9197
2004	25-ene	59	27-dic	184	2-feb	6-sep	9481	224	9422	112	9297
2005	26-feb	45	27-dic	1244	6-mar	10-jun	10.846	104	10801	200	9602
2006	18-feb	164	27-dic	839	26-feb	12-jul	10.241	144	10077	168	9402
2007	14-mar	115	19-dic	50,5	22-mar	21-ago	10.282	160	10167	120	10232
2008	10-feb	60	19-dic	91	18-feb	10-jun	10.155	120	10095	192	10064
2009	14-mar	47	27-dic	951	23-abr	6-sep	9278	176	9231	112	8327
2010	6-mar	71	19-dic	57	14-mar	26-jun	8675	112	8604	176	8618
2011	18-feb	26	27-dic	15	6-mar	21-ago	9917	184	9891	128	9902
2012	2-feb	22	11-dic	314	18-feb	18-jun	9979	136	9957	176	9665
2013	2-feb	27	19-dic	23	6-mar	5-ago	9352	184	9325	136	9329
2014	9-ene	13	11-dic	203	30-mar	5-ago	9231	208	9218	128	9028
2015	2-feb	18	27-dic	555	15-abr	12-jul	10.832	160	10814	168	10277
2016	6-mar	28	19-dic	118	7-abr	12-jul	8897	128	8869	160	8779
2017	18-feb	249	19-dic	1061	26-feb	12-jul	13281	144	13032	160	12220
2018	10-feb	176,9	27-dic	1098	18-feb	10-jun	13316	120	13139	200	12218

Tabla I: Valores de cobertura de nieve, fechas de ocurrencia de valores mínimos y máximos desde 2000 a 2018 estimados mediante MOD10A2 y períodos con predominio de acumulación o fusión. Las fechas corresponden al inicio de cada compuesto de 8 días. Los números entre paréntesis se refieren a los parámetros esquematizados en la Figura 2.

dos fechas de máxima acumulación en los años 2002, 2005, 2009, 2014, donde los picos dobles indican un cambio abrupto en el área cubierta de nieve, que puede resultar de un evento de nevadas, donde cada evento modificaría

abruptamente la cobertura. En todos los casos el segundo punto de máxima cobertura siempre fue superior y ocurrió en agosto y septiembre, y *iii*) el proceso de fusión de nieve fue más lento que la acumulación (2000, 2003, 2006, 2008,

A)



B)

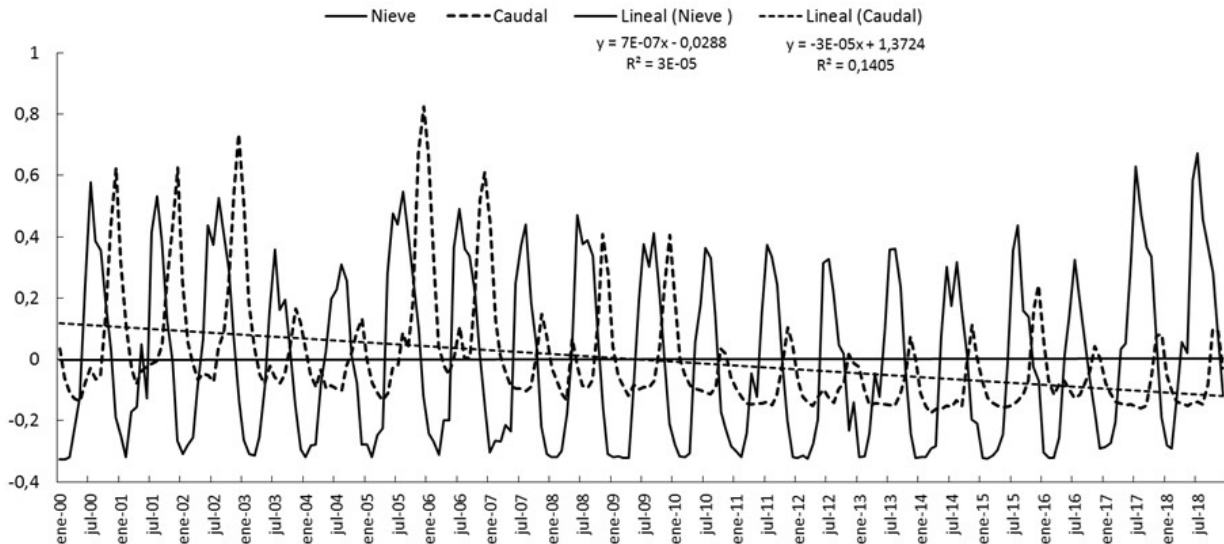


Figura 4: A) Promedio mensual de la cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado en (i) un año de acumulación más lenta que la fusión (2004), (ii) un año con dos fechas de máxima acumulación (2002), (iii) año con la fusión más lenta que la acumulación (2008). B) Promedio mensual de la cobertura de nieve (líneas continuas en color negro) y del caudal (líneas punteadas en color negro) centrados y escalados desde 2000 a 2018, y sus líneas de tendencia respectivas (en líneas punteadas).

2012, 2016, 2017, 2018). También la tendencia decreciente de cobertura desde 2006 a 2014 estaría influyendo en la variabilidad mensual, por presentar valores muy bajos respecto al promedio mensual del resto de los años.

Por otro lado, el caudal medio mensual registrado en la estación Buta Ranquil mostró una disminución estadísticamente significativa

en la serie de años analizada (2000-2018), especialmente desde el año 2009 (Figura 4 B). El caudal promedio para la serie analizada fue de $134,5 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$, con un máximo de $586 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ en diciembre de 2005 y mínimo de $38,6 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ en el mes de marzo de 2014. En coincidencia con Lauro et al. (2016) los caudales extremos (máximos y mínimos) son considerablemente variables y con gran

amplitud. Durante los meses de verano el río Colorado en Buta Ranquil evidenció un aumento del derrame del río (Figura 5) producto de la fusión de la nieve acumulada en otoño-invierno. Sus caudales mensuales son mayores en el mes de diciembre, seguido del mes de noviembre, enero y octubre. Esto evidencia que sus aportes provienen de fusión nival y de la precipitación pluvial. A partir de la secuencia de ocurrencia de los caudales es clasificado como un río con régimen simple de alimentación sólida, nival de montaña, subespecie nival mitigado (Lauro *et al.*, 2016). Los ríos cuyanos, como el río Grande y Barrancas, entre los 30° y 40° de latitud sur, se caracterizan por esta gran variabilidad interanual en sus caudales según Vich *et al.* (2014). Existió una relación directa entre el

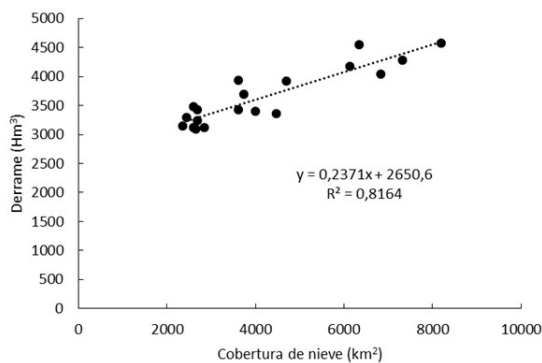


Figura 5: Relación del derrame anual del río Colorado (Hm³) en la estación Buta Ranquil y la cobertura de nieve promedio (km²) estimada mediante MOD10A2, desde 2000 a 2018.

derrame anual de la estación Buta Ranquil y el área cubierta por nieve promedio por año para toda la cuenca alta del río Colorado (Figura 5). En el caso de los años secos, la cobertura de nieve registró valores entre 2900 y 3500 km² con derrames por debajo del promedio (4600 Hm³). Si bien los años 2003 y 2010 presentaron similar cobertura de nieve, el derrame registrado presentó una diferencia de 1500 Hm³. En años donde las nevadas fueron superiores a los años normales, como en 2000, 2002 y 2005, se observó lo mismo. Es decir, en algunos casos ante similares coberturas estimadas, el derrame

varía ampliamente, lo que puede deberse a sobre o subestimaciones del área cubierta por nieve (Cara *et al.*, 2016), al aporte de las precipitaciones líquidas, el espesor de la capa de nieve o los equivalentes de agua nieve, que no pueden ser cuantificados con la metodología utilizada (Ceballos-Barbancho *et al.*, 2018).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se obtuvo una serie temporal de datos de cobertura de nieve para la cuenca del río Colorado de 19 años, los patrones de variación intra-anual de la misma y su relación con el caudal. Si bien había antecedentes de estudios similares en otras cuencas argentinas, no existían este tipo de investigaciones para la zona bajo estudio sobre la dinámica y acumulación de la cobertura de nieve para toda la cuenca alta. Por lo tanto, este análisis proporcionó una mayor comprensión de los patrones espaciales y temporales de la cobertura de nieve y su variación anual e interanual.

Los resultados evidenciaron una importante variabilidad intra-anual e interanual en la cobertura de nieve. En cuanto a la primera, este trabajo mostró una elevada variabilidad en la cobertura mensual durante todo el año y, particularmente, en el otoño-invierno. A partir de ella fue posible describir tres patrones en la dinámica de acumulación o fusión de la nieve, a partir del aumento o disminución de la cobertura, respectivamente. El análisis de la cobertura de nieve durante el período de fusión es muy importante para la estimación de los aportes de agua a toda la cuenca. En ese período la cobertura de nubes es menor y la respuesta de la nieve a los cambios de temperatura influye rápidamente en las áreas de menor altitud donde la cobertura de nieve presenta un espesor menor. En cuanto a la variabilidad interanual, se encontró una disminución del área cubierta por nieve desde el 2000 al 2018.

Los resultados presentados ponen en evidencia la importancia del uso de esta información como una valiosa herramienta para el estudio, mapeo

y seguimiento de cuencas de régimen nival de grandes extensiones de baja accesibilidad, y en un contexto prevaleciente de variabilidad climática. A su vez, se ha demostrado que existe una alta correlación entre el derrame y área cubierta de nieve. Esto toma especial relevancia en situaciones de bajo caudal en el río Colorado, que representan la principal limitante para el desarrollo y la extensión de la agricultura bajo riego en la cuenca.

Si bien la metodología utilizada en este trabajo resulta útil y replicable para conocer la cobertura de nieve de forma periódica y en tiempo real, resultaría fundamental contar con mayor información sobre densidad, espesor y humedad de la nieve, ya sea mediante relevamientos a campo, la instalación de una red de monitoreo permanente o imágenes de radar. También sería interesante correlacionar los valores estimados de cobertura de nieve con imágenes de mayor resolución temporal. A su vez, estudiar la temperatura de superficie y la variación de la isoterma de cero grados y su relación con la cobertura de nieve en cada piso altitudinal de las subcuencas serviría para describir los patrones de fusión de la nieve. De esta forma, el monitoreo de la cobertura de nieve a partir de este tipo de estudios, se presenta como una oportunidad para prever la oferta de agua de la cuenca a mediano plazo, y sienta las bases para futuras planificaciones respecto al uso del agua en la cuenca, con vistas al ordenamiento territorial.

REFERENCIAS

Aumassanne, C. M., Beget, M. E., Gaspari, F. J., Di Bella, C. M., Oricchio, P. y Sartor, P. D. 2018: Morfometría de la cuenca alta del río Colorado: descripción a partir de un modelo digital de elevación. *Boletín Geográfico Universidad Nacional del Comahue* 40 (1): 13-29.

Aumassanne, C. M. 2019: Impacto de los cambios en el uso y la cobertura de la tierra y de la variación del clima, sobre los principales componentes del balance de agua en la

cuenca del río Colorado, Argentina. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. (Disponible en <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/82130>).

- Aumassanne, C. M., Beget, M. E., Di Bella, C. M., Oricchio, P. y Gaspari, F. J. 2019: Cobertura de nieve en las cuencas de los ríos Grande y Barrancas (Argentina) y su relación con la morfometría. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*. Recibido 19 de junio de 2018, aceptado 21 de enero de 2019, publicado online 4 de diciembre de 2019. <http://ria.inta.gob.ar/trabajos/cobertura-de-nieve-en-las-subcuencas-de-los-rios-grande-y-barrancas-argentina-y-su-relacion>.
- Boninsegna, J. y Delgado S. 2002: Atuel River streamflow variations from 1575 to present reconstructed by tree rings, their relationships to the Southern Oscillation. In: Trombotto, D. and R. Villalba (eds.), 2002. "IANIGLA, 30 Years of Basic and Applied Research on Environmental Sciences", Zeta Editores, Mendoza, Argentina, pp. 31-34.
- Boninsegna, J. y 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° 161.
- Campagnucci, R. H. 2007: Alcances de El Niño como predictor del caudal de los ríos andinos argentinos. *Ingeniería hidráulica en México* 3, 23-35.
- 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.

- Ceballos-Barbancho, A., Llorente-Pinto, J. M., Alonso-Gonzalez, E., Lopez-Moreno, J. I. 2018: Dinámica del manto de nieve en una pequeña cuenca de montaña mediterránea: el caso del río Tormes (Cuenca del Duero, España). *Revista de Geografía Norte Grande*, 71, 9-34. ISSN 0718-3402.
- Cogliatti, M. G., Groch, D., Finessi, F. 2015: Utilización de producto 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 en: https://www.researchgate.net/publication/320720242_Utilizacion_de_productos_MOD10A1_para_el_estudio_de_la_variabilidad_de_cobertura_de_nieve_en_la_Cordillera_del_Viento_Neuquen_Argentina).
- 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 en: www.coirco.com.ar.
- Dahri, Z. H., Ahmad, B., Leach, J. H., Ahmad, S. 2011: Satellite-based snow cover distribution and associated snowmelt runoff modeling in SWAT river basin of Pakistan. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences* 48 (1), 19-32.
- Halcrow. 2013: Cuenca del río Colorado determinación de áreas de riesgo hídrico. Programa Multisectorial de preinversión III. Préstamo BID 1896/OC-AR. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado. Hidroestructuras S.A.
- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V. 2001: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms. (http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod10.pdf).
- Hall, D. K., Riggs G. A. y Salomonson, V. V. 2006: MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m. Version 5. Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <http://sci-hub.tw/10.5067/ACytyzB9BEOS>.
- Herns, I., y Jorge, J. 2012: Variación anual e interanual del manto nivoso en el Port del CompteSerra 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. (http://www.glaciaresargentinos.gov.ar/wpcontent/uploads/provincias/Mendoza/docs/informes/informe_final_grande_APN_24-04-2018.pdf).
- Lascano, M. E. y Velasco, I. 2007: Estimación de cobertura de nieve en los Andes Centrales con datos NOAA-AVHRR. Cuencas de los ríos Colorado y Neuquén. www.infraestructura.com.ar.
- Lauro, C., Vich, A. y Moreiras, S. M. 2016: Variabilidad del régimen fluvial en cuencas de la región de Cuyo. *GEOACTA* 40 (2), 28-51.
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Le Quesne, C. y Araven, 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. *J. Climate* 19 (24), 6334-6352.
- Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Brizuela, A. B. y Jacksone, R. B. 2012: The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 154, 2-11.
- Paudel, K. P. y 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.
- Salomonson, V. V. y Appel, I. 2004: Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. *Remote*

- Sensing of Environment 89, 351-360.
- Tahir, A. A., Chevallier, P., Arnaud, Y., Ashraf, M. y Bhatti, M. T. 2015: Snow cover trend and hidrological 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.
- Thapa, A. y Muhammad, S. 2020: Contemporary snow changes in the Karakoram region attributed to improved MODIS data between 2003 and 2018. *Water* 12 (10), 2681. <https://doi.org/10.3390/w12102681>.
- Telesca, L., Shaban, A., Gascoin, S., Darwich, T., Drapeau, L., Hage, M. E. y 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.
- Vich, A. J., Norte, F. A. y Lauro, C. 2014: Análisis regional de frecuencias de caudales de ríos pertenecientes a cuencas con nacientes en la cordillera de Los Andes. *Meteorológica*, 39, 3-26.
- Xu, C., Chen, Y., Li, W., Chen, Y. y Ge, H. 2008: Potential impact of climate change on snow cover area in the Tarim River basin. *Environmental Geology*, 53, 1465-1474.