

# USO INTEGRADO DE DATOS SATELITALES PARA EL MONITOREO DE PARÁMETROS HIDROMETEOROLÓGICOS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO COLORADO, ARGENTINA

Ana Paula Salcedo<sup>a</sup>, Carolina Aumassanne<sup>b</sup>, Romina Solorza<sup>c</sup>, Sofia Teverovsky<sup>c</sup>,  
Susana Haye<sup>a</sup> y Patricio Oricchio<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Subgerencia Centro Regional Andino, Instituto Nacional del Agua, Mendoza, ARGENTINA

<sup>b</sup>Agencia de Extensión Rural de INTA 25 de Mayo, La Pampa, ARGENTINA

<sup>c</sup>Gerencia de Observación de la Tierra. Comisión Nacional de Actividades Espaciales,  
Córdoba, ARGENTINA

<sup>d</sup>Instituto de Clima y Agua de INTA Castelar, Buenos Aires, ARGENTINA.

e-mail: [apsalcedo@ina.gob.ar](mailto:apsalcedo@ina.gob.ar)

## RESUMEN

La cuenca del río Colorado tiene un régimen hidrológico que depende casi exclusivamente del agua de deshielo. Por lo tanto, existe una estrecha relación entre la nieve caída en el invierno en la alta cuenca y los caudales durante la primavera-verano. Por tratarse de cuencas de grandes extensiones, los datos de las estaciones meteorológicas y nivológicas no son suficientes para cuantificar la acumulación nival y la posterior fusión, debido a su baja representatividad espacial. Esa limitación puede superarse con el uso integrado de datos satelitales ópticos y de Radar de Apertura Sintética (SAR), y datos de estaciones de medición en campo. En el marco de un convenio interinstitucional INA-INTA-CONAE, se está trabajando en el desarrollo de un sistema integrado de datos para asistir al monitoreo de la cuenca, estableciendo como objetivos a mediano plazo: caracterizar la disponibilidad total de nieve; conocer la dinámica del deshielo, identificando el comienzo y tiempo de retardo en función los parámetros morfométricos de la cuenca; y utilizar estos parámetros como entrada en un modelo de simulación hidrológica. En ese contexto, se presentan aquí los primeros resultados del análisis de la nieve húmeda estimada con datos Sentinel-1, en un sector del río Grande, cuenca del Colorado. Los resultados se validaron con mediciones de equivalente de agua en nieve y caudales, analizando la proporción de nieve próxima a la fusión con datos SAR, respecto al área total de nieve estimada con datos ópticos. Se identificó el inicio de la fusión a mediados de agosto, con valores en torno al 5 % de superficie de nieve en fusión y su finalización hacia principio-mediados de noviembre, con valores máximos de hasta 40 %, disminuyendo en diciembre la cobertura nival. En la actualidad, se están integrando a este trabajo nuevas fuentes de información como los datos SAR del satélite SAOCOM.

*Palabras Clave:* Nieve de fusión, Cuenca Colorado, Sentinel 1.

## **INTRODUCCIÓN**

La cubierta de nieve en las cuencas andinas constituye una importante reserva de agua dulce, para el abastecimiento humano, productivo, generación de energía, turismo, recreación y requerimientos ecológicos. El régimen hídrico de las cuencas del centro oeste de Argentina es esencialmente pluvio-nival y, en consecuencia, es fuertemente dependiente de la cantidad de nieve que precipita durante el invierno y se acumula en las altas cuencas (Boninsegna & Llop, 2015). Existe una alta relación entre la cantidad de nieve caída durante la estación invernal y los caudales del período estival (Masiokas et al., 2006). De esta manera, del agua proveniente de la fusión de la nieve dependen gran cantidad de actividades sociales y productivas. Por lo cual, en estas cuencas el conocimiento de la cantidad de nieve acumulada, es clave para la gestión y aprovechamiento sostenible del agua..

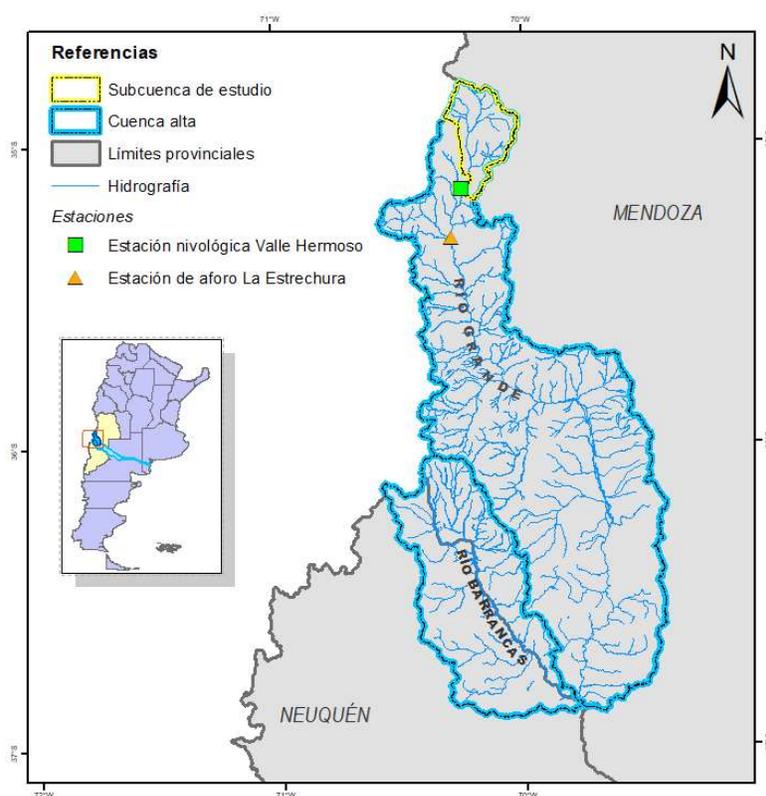
Para cuantificar la acumulación y fusión de nieve, el uso de datos provistos por estaciones meteorológicas, cateos o colchones de nieve no suelen ser suficientes en cuencas de grandes extensiones debido, principalmente, a la baja representatividad espacial de estas mediciones (Lascano & Velasco, 2007). En general, no permiten caracterizar la enorme variabilidad de ambientes y condiciones existentes en áreas de montaña (Cara et al., 2016). Por tal motivo, los sensores remotos montados sobre plataformas satelitales resultan una herramienta útil para la estimación del área cubierta por nieve debido a las características espectrales propias de la nieve (Aumassanne, 2019). Mientras que el mapeo de nieve desde sensores ópticos aprovecha el alto albedo que tiene la cobertura nival, su estimación con Radars de Apertura Sintética (SAR) se basa, principalmente, en la atenuación que muestra la señal de respuesta debido a la presencia de agua líquida en el paquete de nieve. Existen diversos estudios (Shi & Dozier, 1995 y 2000; Nadir Arslan et al., 1998; Martini et. al 2006; Pettinato et al., 2004 y 2011; Rott, et. al 2009) que explican variadas metodologías y algoritmos para la estimación de área cubierta de nieve con datos SAR. La mayoría de ellos se basan en los desarrollos de Nagler & Rott 2000, el cual se fundamenta en la diferencia entre la señal retrodispersada del suelo cubierto por nieve húmeda y suelo sin nieve o con nieve seca. Asimismo, y profundizando en esta línea de investigación, Marin et al. 2020 y Pasian et al. 2020, han podido diferenciar fases en el deshielo al comparar la respuesta de la señal radar (en este caso Sentinel-1, banda C) con mediciones y simulaciones de Equivalente de Agua en Nieve (EAN) y Contenido de Agua Líquida (CAL) en los Alpes italianos.

En Argentina, con datos ALOS PALSAR en banda L, Solorza et al. 2016, realizaron estimación de nieve en una cuenca cordillerana al norte de la Patagonia Argentina. Asimismo, con datos ERS-2 en banda C, Salcedo A.P 2011, estimó cobertura de nieve húmeda y seca en la cuenca del río Neuquén en la cordillera Argentina. Unos kilómetros al norte de Neuquén en la provincia de Mendoza, Teverovsky et al. 2018 estimaron cobertura de nieve húmeda en la cuenca del río Tupungato con datos Sentinel- 1.

## **ÁREA DE ESTUDIO**

Para este trabajo, se definió como área de estudio una subcuenca en la porción más meridional de la cuenca alta del río Colorado, precisamente, en la zona norte de la

subcuenca del río Grande, siendo este el principal afluente del río Colorado. La subcuenca seleccionada tiene 624 km<sup>2</sup>, cuyo cierre se encuentra en proximidades de la estación nivológica Valle Hermoso (Fig. 1). El río Colorado posee vertiente Atlántica y sus nacientes se ubican en la cordillera de los Andes entre las latitudes 35° y 37° Sur. Posee dos tributarios principales, el río Grande y el río Barrancas. 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-1. 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-1 (Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública y Comité Interjurisdiccional del río Colorado, 2013).

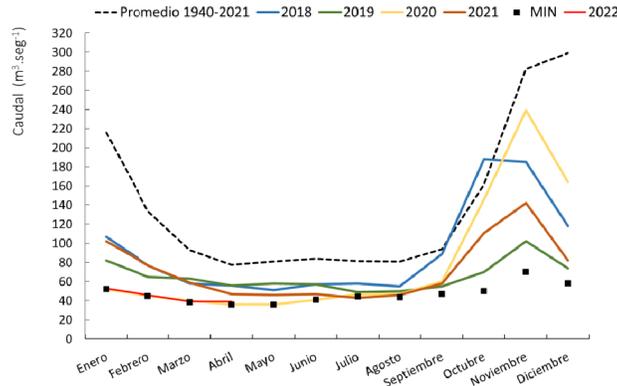


**Figura 1.** Mapa de ubicación del área de estudio

En vista de la situación hidrometeorológica de los últimos 11 años, donde la cuenca atraviesa el período seco más extenso, sumado a las mayores demandas de agua, principalmente desde el sector productivo, es elemental conocer la dinámica espacio temporal de la cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado, y la consecuente escorrentía originada por la fusión de la nieve.

La acentuada sequía que afronta la región sumado a los escenarios futuros de cambio climático que indican déficit de precipitación para los próximos años, y disminución de

los caudales (situación que se observa en la Fig. 2), hacen necesario adquirir formas para adaptarnos a estos nuevos contextos. Por tanto, unir esfuerzos entre instituciones para desarrollar métodos y técnicas innovadoras que colaboren en el conocimiento de los procesos en alta montaña, es clave para conocer la oferta hídrica y planificar la demanda.



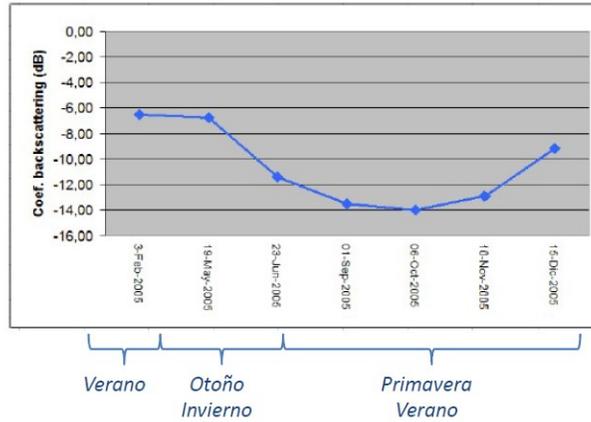
**Figura 2.** Caudal medio mensual del río Colorado en la estación But Ranquil (Neuquén).

En el presente trabajo se mostrarán los primeros resultados obtenidos en el marco de convenios interinstitucionales de cooperación técnica que se encuentran actualmente en ejecución. En este caso, se mostrarán resultados en cuanto al uso de datos satelitales SAR en el conocimiento de las condiciones de la nieve en su fase de deshielo.

## MÉTODOS

Para el conocimiento de la cobertura nevada en su fase de deshielo, se utilizan dos aproximaciones metodológicas.

La primera permite generar mapas de cobertura de nieve en proceso de fusión, y se basa en una técnica de detección de cambio con imágenes SAR a partir de un cociente de bandas (Nagler 1996 y Nagler y Rott 2000, 2004). El procedimiento se sustenta en el cambio estacional significativo que presenta el coeficiente de retrodispersión  $\sigma_0$  (o eco de retorno de la señal a la antena SAR), entre las estaciones de invierno y verano (con nieve seca y sin nieve respectivamente), respecto a la estación de fusión o de primavera (Fig. 3). Por lo tanto, mediante un cociente de imágenes SAR de distintos períodos, es posible estimar la superficie cubierta de nieve húmeda o próxima a fusión, es decir aquella que posee un  $CAL > 0$  (Solorza. *et. al.* 2016). Cabe aclarar, que para la señal SAR, en condiciones de nieve seca (nieve fresca recién caída o nieve de invierno con  $0 < CAL$ ) así como sin nieve (verano) es similar, en el sentido que la señal de retorno mostrará la retrodispersión superficial de la interfase nieve/suelo, haciendo que para el invierno la nieve tenga un comportamiento “transparente” a la señal. Por tal motivo, bajo esta técnica no es posible cartografiar la nieve seca.

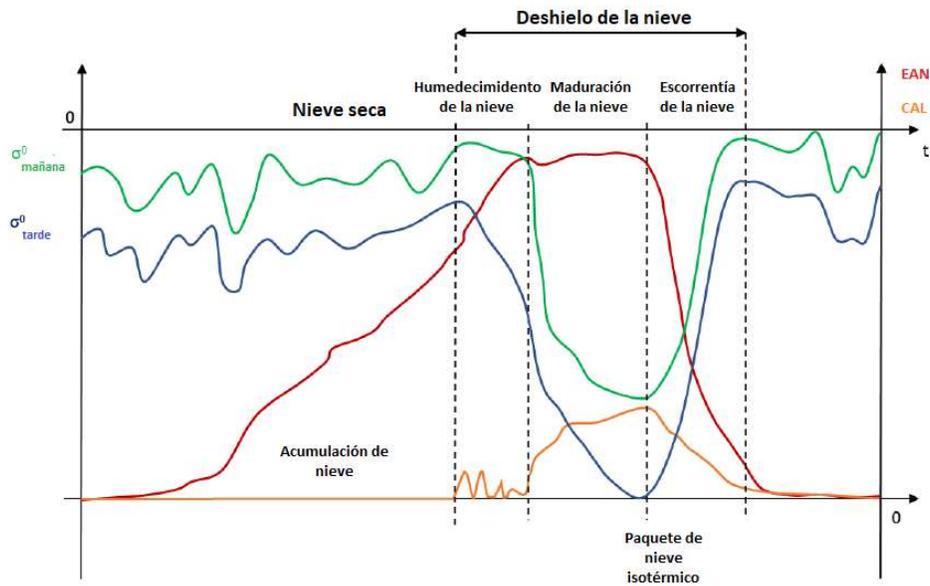


**Figura 3.** Variación del  $\sigma_0$  a lo largo de las estaciones. Salcedo, A.P 2011.

La segunda metodología utilizada permite identificar fases en el proceso de deshielo dentro del paquete de nieve, en particular las fases de humedecimiento y maduración, así como el inicio de la fusión y posterior escorrentía. En este caso se siguen los desarrollos de Marin et al. 2020 y Pasian et al. 2020, que analizan la variación del coeficiente de retrodispersión de imágenes SAR Sentinel-1, respecto a la variación del EAN y de CAL medido en campo, así como simulado a partir de modelos de base física.

De acuerdo a Pasian et al. 2020, la fase de humedecimiento aparece al inicio de la temporada de primavera, cuando la capa superficial del paquete de nieve se funde durante el día y se recongela durante la noche o luego de un evento de precipitación. La fase siguiente es la de maduración, que se caracteriza por una percolación de la humedad superficial hacia las capas subyacentes, lo que pronto convierte al pack de nieve en isotérmico. Al final del proceso, el pack de nieve no puede retener más agua circundante y da inicio a la fusión total y posterior escorrentía.

La Fig. 4 muestra el incremento significativo de CAL, que indica el comienzo de la fase de humedecimiento, mientras que la caída del EAN indica el inicio del escurrimiento. Estas variaciones se pueden relacionar con los cambios de  $\sigma_0$  exhibidos por la señal SAR, entre los cuales se evidencia que el mínimo valor de  $\sigma_0$  coincide con la caída del EAN y CAL, por tanto el inicio de la escorrentía por fusión.



**Figura 4.** Representación esquemática de la evolución del coeficiente de retrodispersión ( $\sigma_0$ ) comparado con CAL y EAN. Las tres fases están identificadas como humedecimiento, maduración y escorrentía. Pasian et al. 2020

En la aplicación de estas dos metodologías se utilizó una serie de imágenes SAR de Sentinel-1 descargadas del sitio web de Copernicus, de los periodos de fusión de los años 2015, 2016 y 2019. Se descargaron en nivel de procesamiento 1 GRD (Ground Range Detected) en modo IW (Interferometric Wide Swath) (Tabla I). El preprocesamiento de las imágenes se realizó en el software de la Agencia Espacial Europea SNAP (Sentinel Application Platform), que consistió en la corrección orbital, eliminación del ruido térmico y de bordes, calibración y corrección topográfica.

Para las comparaciones con mediciones de terreno, se utilizaron los registros de EAN de la estación de alta montaña Valle Hermoso, que pertenece al Sistema de Información Hidronivometeorológico, Departamento General de Irrigación, Mendoza, y de la estación de aforo La Estrechura del Sistema Nacional de Información Hídrica, Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Nación.

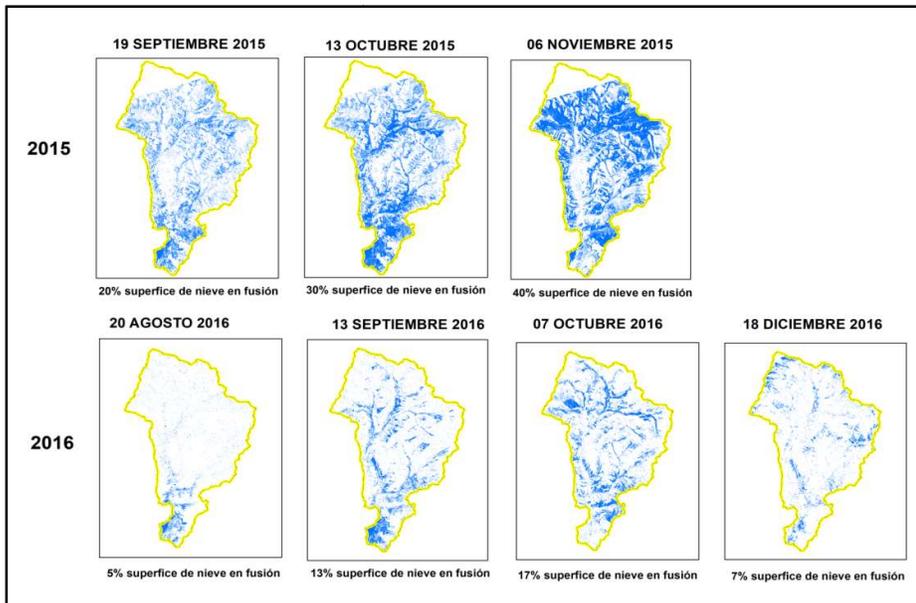
Tabla I. Imágenes SAR Sentinel-1 utilizadas

Sentinel 1	Polarización	Modo	Track
19-sep-15	VV	IW - GRD	83
13-oct-15			
6-nov-15			
20-ago-16			

13-sep-16			
7-oct-16			
18-dic-16			
10-ago-19			
3-sep-19			
27-sep-19			
9-oct-19			
21-oct-19			
2-nov-19			
14-nov-19			
8-dic-19			
20-dic-19			

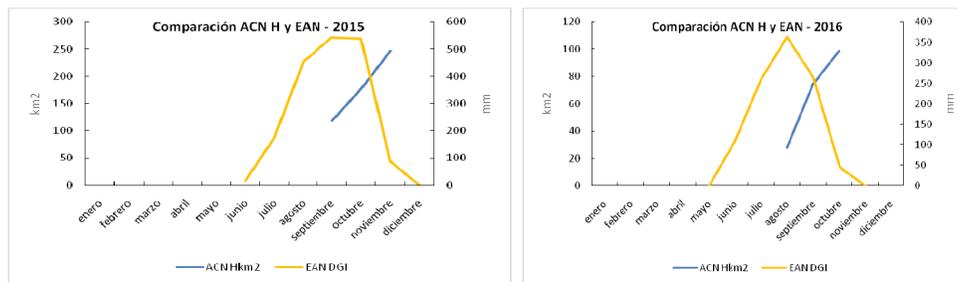
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la aplicación del método de cociente de imágenes se obtuvieron los mapas de nieve en proceso de fusión para todas las fechas descargadas. En la Fig. 5 se observan los mapas para los meses de primavera de los años 2015 y 2016. Para el año 2015, en el inicio de la fusión se calcula un 20 % de nieve húmeda y ya entrada la primavera, en noviembre, con un 40 % de nieve húmeda. Para el año 2016 se identifica una variación similar, con el pico de superficie de nieve en fusión en octubre/noviembre.



**Figura 5.** Mapas de área cubierta de nieve húmeda para los años 2015 y 2016.

El aumento del área cubierta de nieve húmeda (ACN H) coincide temporalmente con el inicio de la caída del valor de EAN (Fig. 6). El año 2015 registró mayores nevadas respecto al 2016, observándose esto en una menor superficie de ACN H en 2016 así como también menor registro de EAN (150 mm menos en 2016 respecto a 2015).

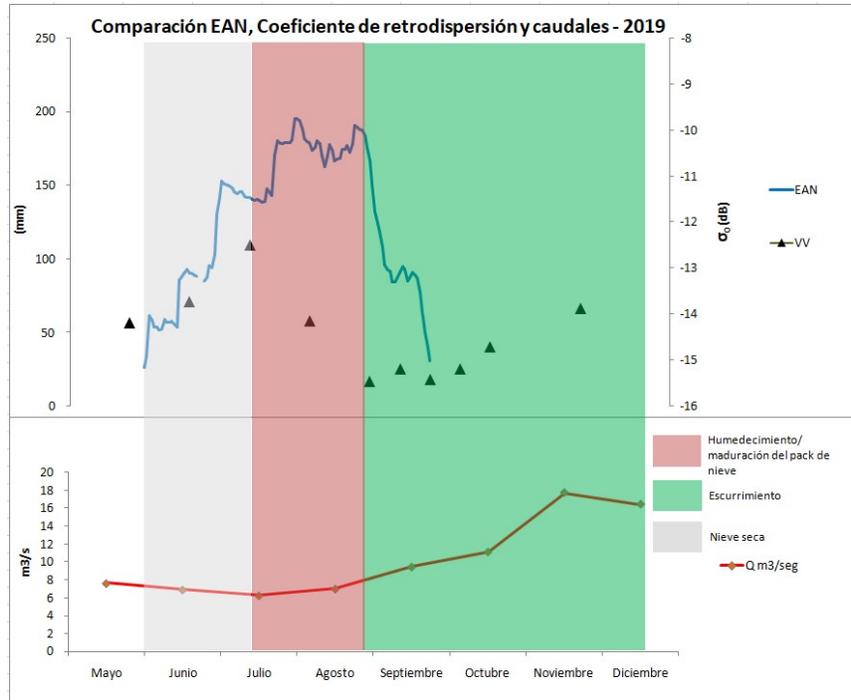


**Figura 6.** Comparación del área cubierta de nieve húmeda y EAN para los años 2015 y 2016.

En relación a la identificación de las fases dentro del proceso de deshielo, se pudo diferenciar en la zona de trabajo, entre la fase de humedecimiento/maduración respecto a la fase de escorrentía. Para ello, se utilizó toda la serie de imágenes SAR del año 2019 y su comparación con las mediciones de EAN. No fue posible diferenciar entre las fases de humedecimiento y maduración por no contar con mediciones de CAL.

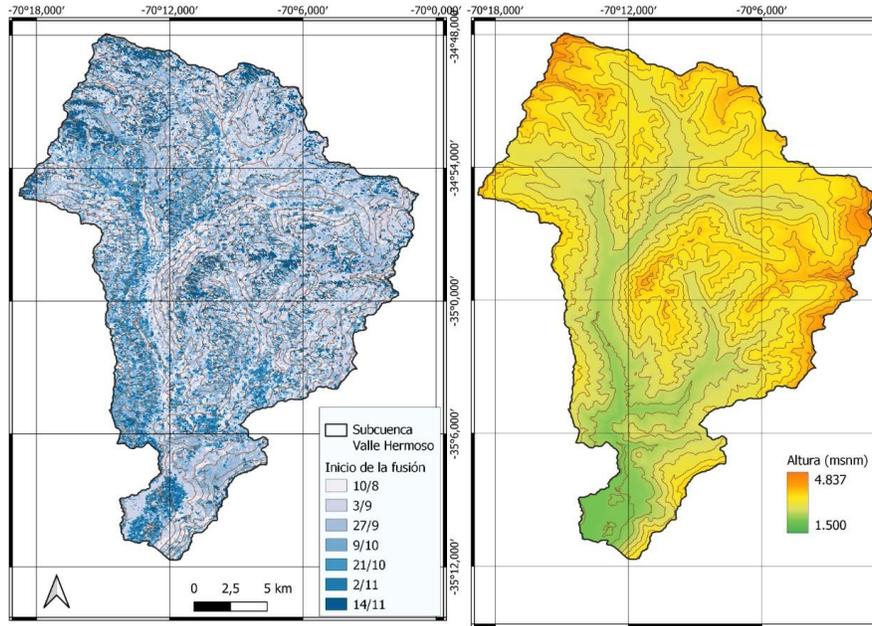
El mínimo valor de  $\sigma_0$  (polarización VV) coincide con el máximo valor de EAN (hacia fines de Agosto) y posterior disminución abrupta del mismo indicando el inicio del proceso de fusión/escorrentía (Fig. 7). También en la misma gráfica se observan los valores de caudales de la estación de aforo La Estrechura, en la que se identifica el aumento del caudal luego de la disminución del EAN. Tomando este concepto y

asumiendo que todos los píxeles con valores mínimos de  $\sigma_0$  indican el máximo de EAN y por tanto el inicio del deshielo, se generó un mapa (Fig. 8) con los valores mínimos de  $\sigma_0$  por cada píxel por cada fecha de Sentinel-1 del año 2019.



**Figura 7.** Identificación de fases del deshielo a partir de la comparación de  $\sigma_0$  y valores de EAN y caudal. En la franja gris se observa el periodo de inicio de nevada (nieve seca), en rosa las fases de humedecimiento/maduración y en verde el inicio del deshielo y posterior escorrentía. Mediciones de EAN estación Valle Hermoso. Mediciones de caudal estación de aforo La Estrechura.

En las zonas bajas del área de estudio, principalmente los valles, los píxeles de valores mínimos (que están en fase de fusión/escorrentía) corresponden a las fechas de agosto e inicio de septiembre, principalmente. En cotas intermedias se ubican las fechas de fines de septiembre y octubre, y en las zonas más altas los píxeles de final de temporada de deshielo de noviembre. Del histograma de frecuencias de cantidad de píxeles por fecha según elevación, se interpreta que en agosto la altura promedio de los píxeles en fusión, es en torno a los 3000 metros, en septiembre 3100 metros, en octubre 3200 metros y en noviembre en 3500 metros, que puede coincidir en algunos casos con zonas englazadas.



**Figura 8.** Mapa de valores mínimos de  $\sigma_0$  indicando inicio de la fusión según fechas de imágenes SAR y modelos digital de elevaciones.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se aplican metodologías tendientes a generar información distribuida en el espacio de las condiciones de la nieve, que otorguen apoyo a los datos puntuales de estaciones de medición en alta montaña y ayuden a la toma de decisiones y a la gestión del recurso en un contexto crítico de escasez hídrica.

Se explota el uso de datos satelitales de radar SAR y su correlación con datos medidos de estaciones en alta montaña permitiendo un seguimiento espacio-temporal de las condiciones del manto nival con distintas fuentes de información.

Las dos metodologías utilizadas permiten conocer los rasgos y comportamiento de la cuenca en su periodo de fusión nival, otorgando datos tales como el inicio de la misma, la superficie de nieve próxima a fusión y las cotas de ubicación.

Por último, se destaca la importancia de realizar convenios interinstitucionales de cooperación técnica para fortalecer vínculos, y aportar capacidades a demandas territoriales concretas.

## REFERENCIAS

Aumassanne, C. M., Beget, M. E., Di Bella, C. M., Oricchio, P. y Gaspari, F. J. 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.gov.ar/trabajos/cobertura-de-nieve-en-las-subcuencas-de-los-rios-grande-y-barrancas-argentina-y-su-relacion>. (2019)

- Boninsegna, J. y Llop, A. 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*. (2015)
- Cara, L., Masiokas, M., Viale, M., Villalba, R. Análisis de la cobertura nival de la cuenca superior del río Mendoza a partir de imágenes MODIS. *Meteorológica*, 41, 21-36. (2016)
- Lascano, M. E. y Velasco, I. Estimación de cobertura de nieve en los Andes Centrales con datos NOAA-AVHRR. Cuencas de los ríos Colorado y Neuquén. [www.infraestructura.com.ar](http://www.infraestructura.com.ar). (2007)
- Lauro, C. Vich, A. y Moreiras, S. M. Variabilidad del régimen fluvial en cuencas de la región de Cuyo. *GEOACTA 40 (2)*, 28-51. (2016)
- Marin, C., Bertoldi, G., Premier, V., Callegari, M., Brida, C., Hurkamp, K., Tschierscha, J., Zebisch, M., and Notarnicola, C. Use of Sentinel-1 radar observations to evaluate snowmelt dynamic in alpine regions. *The Cryosphere*, 14, 935-956 (2020)
- Martini, A., Ferro-Famil, L., &Pottier, E. Snow extent discrimination in alpine areas from polarimetric and multi-frequency SAR data. *EAR Sel. Proceedings 5*. (2006)
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Le Quesne, C. y Araven, J. C. .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. (2006)
- Nadir Arslan, A., Koskinen, J., Praks, J., Alasalmi, H., Kruopis, N., &Hallikainen, M. Retrieving snow water equivalent on C and L band. SAR data for dry snow. *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. IGARSS '98. IEEE International*. (1998)
- Nagler T. Methods and Analysis of Synthetic Aperture Radar Data From ERS-1 and X-SAR for Snow and Glacier Applications. *Ph.D. Dissertation, University of Innsbruck, Austria*. (1996)
- Nagler, T. &Rott, H. Retrieval of wet snow by means of multitemporal SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.38*, 754-765. (2000)
- Nagler, T. &Rott, H. Snow classification algorithm for Envisat ASAR. Proc. of the 2004 *Envisat & ERS Symposium, Salzburg, Austria 6-10 September 2004 (ESA SP-572)*. (2004)
- Pasian, M., Espin-López, P. F., Premier, V., Notarnicola, C., and Marin, C. Identification of multi-temporal snow melting patterns with microwave radars. *IEEE 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. (2020)
- Pettinato, S. Santi, E. Brogioni, M. Paloscia, S. Pampaloni, P. Palchetti, E., Shi, J. Xiong, C. The potencial of Cosmo-Skymed SAR images in mapping snow cover and snow water equivalent. *IGARSS 2011. IEEE*. (2011)
- Pettinato, S., Poggi, P., Macelloni, G., Paloscia, S., Pampaloni, P., &Crepaz, A. Mapping snow cover in alpine areas with Envisat/SAR images. Envisat and ERS. *Symposium, September 6-10. Proceeding ESA ISBN 92-9092-883-2 Salzburg, Austria*. (2004)
- Rott, H. Heidinger, M. Nagler, T. Cline, D. & Yueh, S. Retrieval of snow parameters from ku-band and x-band radar backscatter measurements. *IGARSS 2009. IEEE*. (2009)
- Salcedo, A.P. and Cogliati, M.G. Snow Cover Area Estimation Using Radar and Optical Satellite Information. *Atmospheric and Climate Sciences*, 4, 514-523. (2014)
- Shi, J. & Dozier, J. Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-sar. *Geoscience and RemoteSensing, IEEE TransactionsonVolume: 38 , Issue: 6*. (2000)
- Shi, J. & Dozier, J. Inferring snow wetness using C-band data from SIR-C's polarimetric synthetic aperture radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* (1995)
- Solorza, R. Cogliati, M. Salcedo, A.P. Notarnicola, C. Estimación del Área Cubierta de Nieve con datos SAR en banda L en un sector cordillerano de la Patagonia Argentina. *Rev. La Asoc. Geol. Argentina, vol. 73, pp. 421-429*. (2016)
- Teverovsky, S. Notarnicola, C. Estimation of wet snow cover area with SAR imagery in the basin of Tupungato River, Mendoza, Argentina. (2018)