

EL GLACIAR DE MONTE PERDIDO: CONDICIONES ACTUALES Y EVOLUCIÓN RECIENTE

J. I. LÓPEZ-MORENO¹, E. ALONSO-GONZÁLEZ¹, O. MONTSERRAT²,
L. M. DEL RÍO³, LUZI², N. DEMATTEIS⁴, A. SERRETA⁵, I. RICO⁶,
E. SERRANO-CAÑADAS⁷, M. BARTOLOMÉ¹, A. MORENO¹,
S. BUISAN⁸, J. REVUELTO⁹

RESUMEN

En este trabajo combinamos la aplicación de láser escáner terrestre (TLS), Georadar (GPR) y radar de interferometría (GBSAR) para diagnosticar las condiciones actuales del glaciar de Monte Perdido y estudiar su evolución durante el periodo 2011-2017. El glaciar ha mostrado un claro deterioro durante el periodo analizado, con una pérdida media de espesor de hielo de 6,1 metros, superando los 10 metros en algunos sectores. El radar de interferometría ha permitido detectar zonas donde todavía el hielo se deforma a un ritmo considerable (hasta 4,5 día⁻¹) mientras que en amplios sectores el glaciar permanece completamente estático. La información de georadar ha permitido localizar zonas donde todavía quedan espesores de hielo de entre 30 y 50 metros, pero en general los espesores son muy inferiores. La información obtenida sugiere un rápido deterioro del glaciar que podría llevar a su desaparición en las próximas décadas.

Palabras clave: Láser escáner terrestre (TLS), Georadar (GPR), Radar de interferometría (GBSAR), evolución glaciar, Pirineos.

¹ Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC. Avda Montañana 1005. Zaragoza, 50059, Spain.

² Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA) Av. C.F. Gauss, 7, E-08860 Castelldefels (Barcelona), Spain.

³ Grupo COMPHAS. Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura. Cáceres 10071, Spain.

⁴ Geohazard Monitoring Group, Research Institute for Hydro-Geological Protection, National Council of Research of Italy, Torino, Italy.

⁵ Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Crta Cuarte s/n 22071 Huesca, Spain.

⁶ University of the Basque Country. Dept. Geography, Prehistory and Archaeology. 01006. Vitoria. Spain.

⁷ Departamento de Geografía, Universidad de Valladolid. Valladolid.

⁸ Delegación Territorial de AEMET (Spanish State Meteorological Agency) en Aragón, Paseo del Canal 17, 50007 Zaragoza, Spain.

⁹ Météo-France-CNRS, CNRM, UMR 3589, CEN, Grenoble, France.

THE MONTE PERDIDO GLACIER: CURRENT STATE AND RECENT EVOLUTION

ABSTRACT

This work combines the application of terrestrial laser scanner (TLS), ground-based interferometry radar (GB-SAR) and ground penetrating radar (GPR) to diagnose current conditions and to analyze the recent evolution of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees from 2011 to 2017. The evolution of the glacier surface was surveyed with a TLS, evidencing an important decline of 6,1 m, with areas losing more than 10 m of ice thickness. GB-SAR revealed that areas with higher ice losses are those that are currently with no or very low ice motion. On the contrary, sectors located beneath the areas with less ice loss are those that still exhibit noticeable ice movement (maximum 4,5 cm per day). GPR informed that most of the glacier has less than 30 m of ice thickness, although in some spots it can span between 30 and 50 m. Obtained information suggests a fast deterioration of the ice body that could lead to its total thaw in the next few decades.

Keywords: Terrestrial laser scanner (TLS), ground penetrating radar (GPR), ground-based interferometry radar (GB-SAR), glacier evolution, Pyrenees.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los glaciares del mundo han experimentado un rápido retroceso durante el último siglo, que ha sido particularmente intenso en las últimas dos décadas (Marshall 2014). Los glaciares del Pirineo son los más meridionales de Europa y se encuentran actualmente en una situación crítica (RICO *et al.*, 2017). Así, de los 52 glaciares que existían al final de la pequeña Edad del hielo, solo quedan 19, habiéndose perdido un 88% de la superficie cubierta por hielo (RICO *et al.*, 2017). A pesar de su reducido tamaño, el estudio de los glaciares pirenaicos es muy interesante pues son muy sensibles a las fluctuaciones climáticas (GRUNEWALD & SCHEITHAUER, 2010) y permiten conocer el comportamiento de las masas de hielo durante el momento de su desaparición (HUSS & FISCHER, 2016).

Para diagnosticar el estado de un glaciar determinado es necesario conocer el volumen de hielo que en él permanece y cuantificar su movimiento. Así mismo, conocer las variaciones de volumen de hielo a escala anual nos permite conocer la respuesta del glaciar a la variabilidad y cambio climático reciente. Actualmente se disponen de numerosas técnicas que permiten medir con mucha precisión las variables anteriormente mencionadas, incluyendo las estacas de ablación para el balance de masa y el movimiento del hielo, GPS, georadar, restitución de superficies a partir de fotografías aéreas, imágenes satélite ópticas y de radar, LIDAR terrestre y aerotransportado, fotogrametría, etc. El uso de cada una de ellas dependerá de las características de los glaciares y de la resolución espacial y temporal de las mediciones que se desean obtener. En glaciares muy degradados, su fuerte pendiente, caídas de rocas y la presencia de cavidades dentro del hielo hacen recomenda-

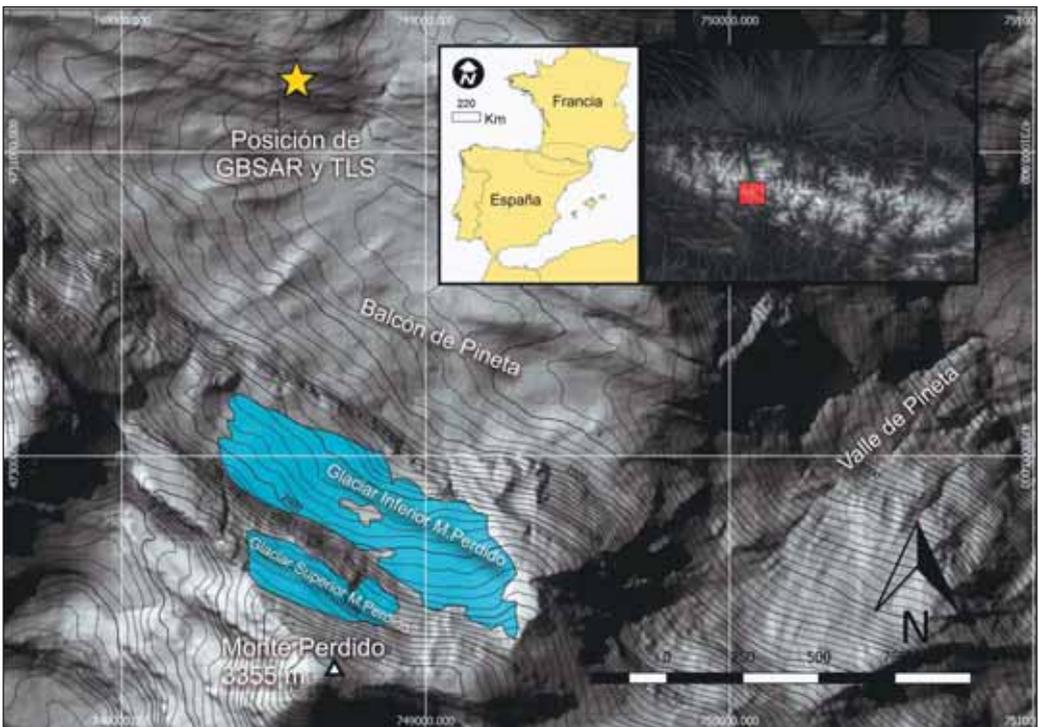


Figura 1. Localización del glaciar de Monte Perdido, y posiciones desde donde se han realizado las mediciones a larga distancia.

Figure 1. Location of the Monte Perdido Glacier, including the scan positions for TLS and GB-SAR

ble recurrir a técnicas que eviten la toma directa de datos (FISCHER, 2016).

El glaciar de Monte Perdido es el tercer glaciar en superficie del Pirineo. En las últimas décadas ha mostrado un claro retroceso en superficie y espesor (JULIAN & CHUECA, 2007; LÓPEZ-MORENO *et al.*, 2016) y en los últimos años ha sido objeto de un seguimiento muy detallado.

En este trabajo se describen los resultados obtenidos en la aplicación de técnicas basadas en la teledetección terrestre (laser escáner terrestre-TLS, georadar-GPR y radar de interferometría-GBSAR) para conocer las fluctuaciones anuales de volumen, el espesor de hielo y su movimiento, así como una discusión de la aplicabilidad de dichas técnicas en glaciares pequeños y avanzado estado de degradación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Caracterización de la zona de estudio

El glaciar de Monte Perdido se localiza en los Pirineos Centrales Españoles ($42^{\circ}40'N$; $0^{\circ}02'15''$). Está orientado hacia el norte bajo la cima del pico de Monte Perdido (3355 m) en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido.

Numerosas morrenas de la Pequeña Edad del Hielo (PEH) claramente indican que hace doscientos años el glaciar se componía de una única masa de hielo, que se dividió en tres cuerpos glaciados conectados por cascadas de seracs. El glaciar inferior desapareció a mediados del siglo 20, y los dos cuerpos restantes (actuales glaciar inferior y superior) se desconectaron durante los años setenta (GARCIA-RUIZ y otros, 2014).

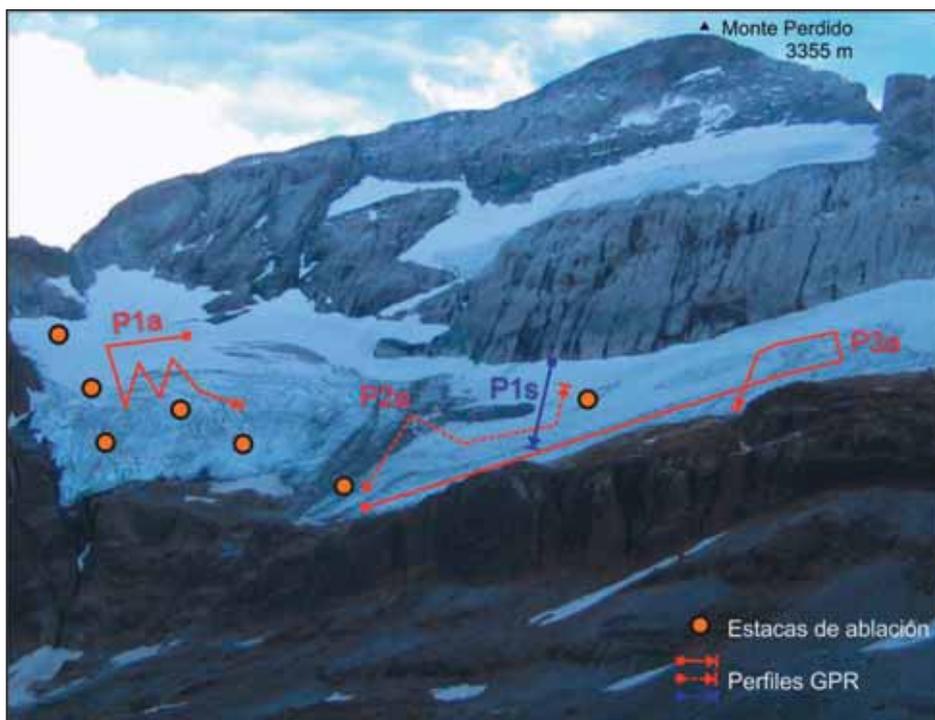


Figura 2. Localización de las balizas de ablación y del perfil de Georadar obtenido en 2016. La fotografía fue tomada en 2011.

Figure 2. Location of the seven ablation stakes, and profile obtained with GPR in spring 2016 (*P1s*, in blue)

Según mediciones realizadas al pie del glaciar y en la cima del pico Monte Perdido, se ha estimado que la isoterma 0 °C se encuentra aproximadamente a 2950 m s.n.m. No se disponen de mediciones directas de precipitación, pero las acumulaciones de nieve que se observan durante primavera indican que durante el periodo de acumulación (desde octubre hasta abril) la precipitación debe superar los 1500 mm.

Métodos

Además de las mediciones geomáticas que más adelante se detallarán, en 2014 se instalaron en el glaciar siete balizas de ablación, en las que se ha medido la altura del hielo y su desplazamiento mediante GPS diferencial (Figura 2).

Laser escáner terrestre, TLS

Se trata de tecnología LIDAR terrestre (BHARDWAJ, 2016) basada en la medición del tiempo de vuelo de pulsos laser emitidos desde el sensor y que retornan tras rebotar con la superficie que se desea medir. El sensor utilizado es el modelo RIEGL LPM-321, que funciona con una longitud de onda de 905 nanómetros (infrarrojo próximo). La emisión de pulsos laser se realiza con un paso de ángulo mínimo de 0,0188°, y una divergencia del haz laser de 0,0468° (LÓPEZ-MORENO *et al.*, 2017). El sensor se ha instalado todos los otoños (finales de septiembre o comienzos de octubre) desde 2011, y durante las primaveras (finales de abril o comienzo de mayo) durante el periodo 2014 a 2017. Se ha dispuesto de una vista casi frontal (la que se observa en la Figura 2) a una distancia de entre 1500 y 2000 metros del glaciar. La metodología para la georreferenciación de las nubes de puntos se describe en detalle en REVUELTO *et al.* (2017). En general el error estimado está por debajo de 0.3 metros en altimetría.

Radar de interferometría, GBSAR

La técnica de GB-SAR (Figura 3) se basa en la interferometría de señales de distinta longitud de onda (TARCHI *et al.*, 1999) permitiendo detectar movimientos y deformaciones milimétricos a distancias de hasta cinco kilómetros (MONSERRAT

et al., 2014). El movimiento relativamente lento del radar requirió largos periodos de adquisición de datos, abarcando el periodo de medición desde el 23 de julio hasta el 18 de agosto de 2015 (28 días).

Desafortunadamente, no se pudieron obtener mediciones continuas durante todo el periodo debido a problemas con los paneles solares, por lo que al final se utilizaron solamente 163 imágenes de tres periodos: 144 durante el 23 y 30 de julio; 18 imágenes el 11 de agosto y 2 imágenes el día 18 de agosto. Los detalles metodológicos aplicados al tratamiento de los datos pueden encontrarse en DEMATTEIS *et al.* (2017). Se procesaron las imágenes tanto considerando únicamente las adquisiciones nocturnas (de 00 a 06 am) como la totalidad de las imágenes. Utilizar únicamente las imágenes nocturnas pretendía minimizar inferencias atmosféricas, lo que resulta en valores más robustos, mientras que el uso de la totalidad de las imágenes permite distinguir entre ciclos nocturnos y diurnos.

Georadar, GPR

En las últimas décadas el uso del georadar se ha extendido para conocer el espesor y las características físicas y estructurales del sustrato subyacente (BRADFORD & HARPER, 2005; DEL RÍO *et al.*, 2014). El uso de georadar en el glaciar de Monte Perdido ha sido complejo por su elevada inclinación (entre 20 y 45°) y abundante agua circulando bajo su superficie. El 30 de abril y el 1 de mayo de 2016 utilizamos una serie de antenas (50, 200 y 500 MHz) de la marca Måla Geoscience para conocer el espesor y la estructura del hielo del glaciar. Las adversas condiciones meteorológicas (viento 60 km h⁻¹ y temperatura inferior a los -8 °C) dificultó esta tarea, si bien la escasa agua circulante permitió obtener una discriminación nítida entre hielo y sustrato rocoso. Las antenas de 50 MHz y 200 MHz se configuraron para alcanzar espesores de hasta 60 metros con resoluciones de 0.9 m and 0.25 m respectivamente. La antena de 500 Mhz se configuró para ver la estructura de la nieve en los ocho primeros metros del perfil. Para estimar el espesor de hielo, asumimos un modelo simple de capas isotropas (nieve, hielo) con velocidades constante en cada capa, y el método que usa la difracción de las hipérbolas detectadas en cada capa (MOORE *et al.*, 1999; LÓPEZ-MORENO *et al.*, 2019).



Figura 3. Sensor GB-SAR desde el punto de medición.

Figure 3. GB-SAR sensor from point of view.

RESULTADOS

Condiciones climáticas del periodo estudiado

La Figura 4 muestra la evolución temporal de la precipitación (desde diciembre hasta abril) y la temperatura (de mayo a septiembre) en la estación meteorológica de Góriz. La precipitación durante

el periodo de acumulación muestra fuerte oscilaciones anuales, entre los 350 y los 1360 mm, pero no muestra ninguna tendencia estadísticamente significativa para el periodo 1982-2017. Sin embargo, la temperatura sí muestra un claro incremento (0,33 °C por década), observándose todos los valores de la serie por encima del percentil 75 desde 2003 en adelante.

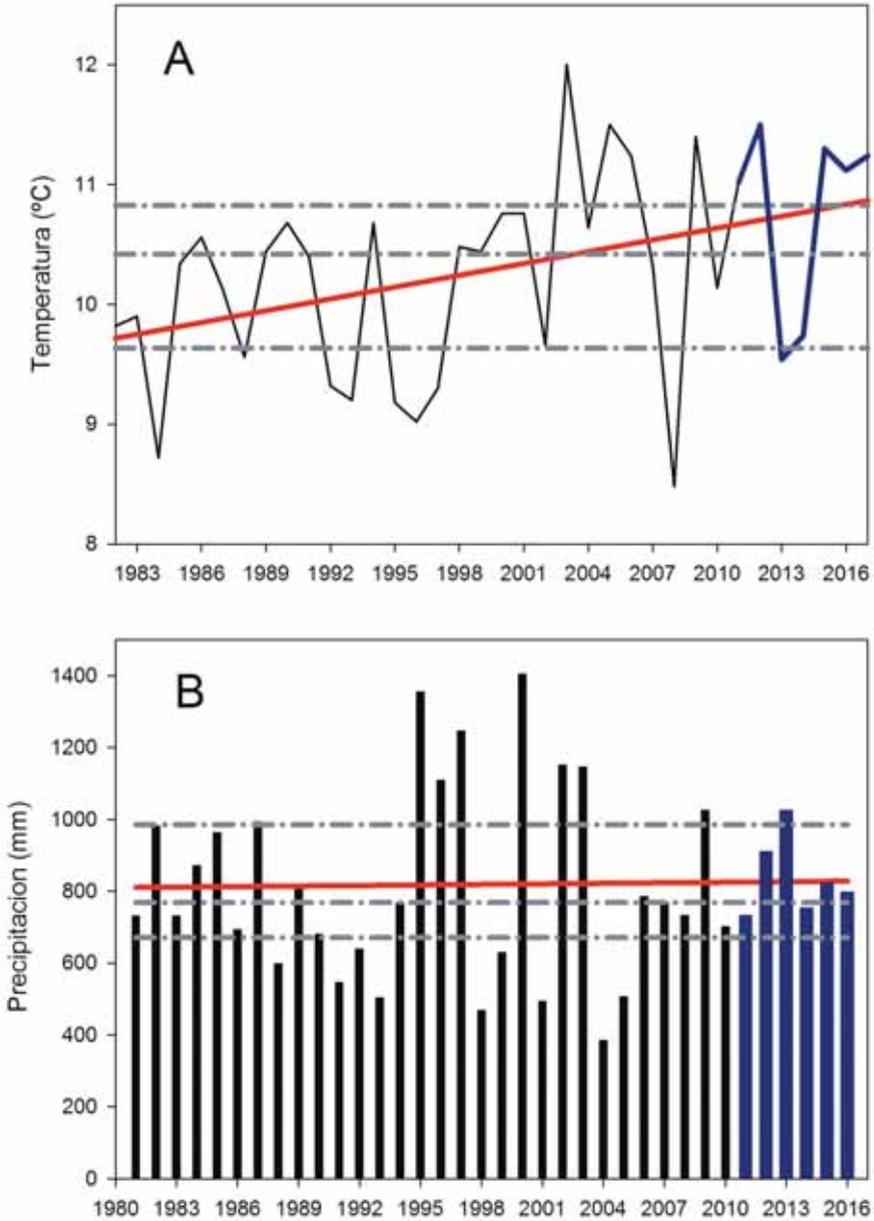


Figura 4. Series temporales de precipitación (periodo de acumulación, diciembre a abril) y temperatura (periodo de fusión, mayo a septiembre). El periodo de mediciones 2011-2016 está indicado en azul. Las líneas punteadas indican la mediana y los percentiles 25 y 75 del periodo 1982-2017.

Figure 4. Temporal series of (A) temperature (accumulation period, December to April) and (B) mean precipitation (ablation season, May to September) in Goriz meteorological station. The 2011-2016 period is highlighted with blue color. Dashed lines indicate the mean and the 25th and 75th percentiles.

Cambios de volumen de hielo y acumulación de nieve medidos mediante TLS

La Figura 5A muestra un descenso generalizado de espesor de hielo durante el periodo de estudio, con un valor medio de pérdida de 6,13 m. Sin embargo, este valor medio enmascara fuertes diferencias espaciales. Así, en algunos sectores el espesor de hielo ha disminuido hasta 15 m (fundamentalmente en la parte inferior de los cuerpos de hielo y el sector occidental del glaciar inferior), mientras que hay áreas que apenas ha mostrado cambios. Los valores de cambio anuales también han mostrado importantes contrastes de un año para otro. Así, los años 2013-2014 y 2015-2016 mostraron pérdidas muy bajas (-0,07 y -0,35 m respectivamente), o incluso en 2012-2013 el glaciar mostró un incremento medio de volumen de +0,33 m. Las pérdidas de hielo se concentraron los años 2011-2012, 2014-2015 y 2015-2016, con reducciones de 1,8, 1,69 y 2,57 m respectivamente.

La Figura 6 muestra la acumulación de nieve sobre el glaciar a finales de las primaveras de 2014, 2015 y 2017 (el escaneo de 2016 fue incompleto debido a las condiciones meteorológicas adversas). La acumulación media para los tres años fue de 3,24 m, con una densidad media (obtenida mediante mediciones manuales) de 454 kg m⁻³. Algunos sectores

del glaciar acumularon hasta 8 m de nieve, mientras que en otras la acción del viento apenas impidió acumulación de nieve.

Velocidad del hielo mediante GBSAR

La Figura 7 muestra el mapa de velocidad de hielo obtenida a partir de 71 imágenes. Las velocidades oscilan entre 1 (color azul) y 4 (color rojo) cm por día, con una precisión estimada en 4,5 mm. Las velocidades más altas se encuentran en el frente del glaciar, mientras que el sector occidental mostró velocidades muy bajas o incluso ausencia de movimiento. Dicho patrón espacial es muy similar al obtenido mediante el seguimiento de las balizas instaladas en el hielo durante el periodo 2014-2017. Los valores de movimiento mostrados por la baliza son ligeramente inferiores a los medidos por georadar, pero debe tenerse en cuenta que se asume que el movimiento del glaciar se ralentiza durante los meses más fríos del año.

Espesor del hielo y estructura interna a partir de georadar

La Figura 8 muestra los tres *radargramas* obtenidos en primavera de 2016 después de un primer

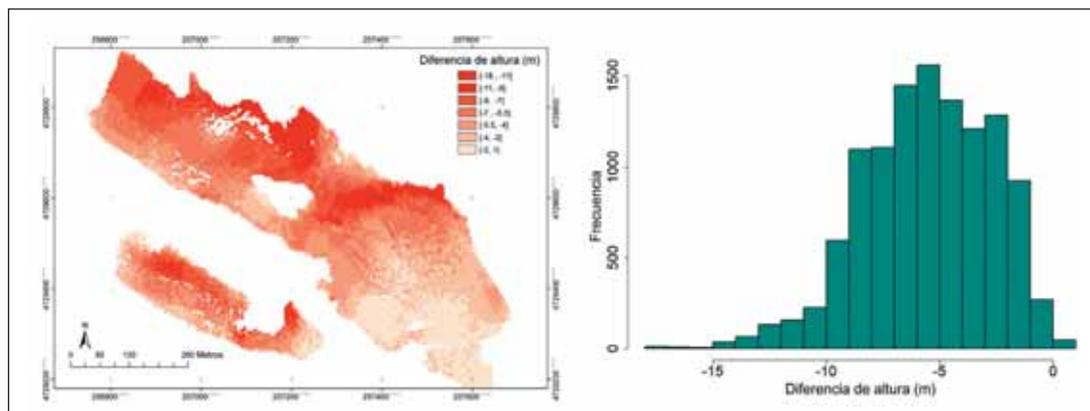


Figura 5. A) Diferencia en la altura de la superficie de hielo entre septiembre de 2017 y septiembre de 2011. B) Distribución de frecuencia en los cambios de altura de hielo a lo largo del glaciar entre 2017 y 2011.

Figure 5. A) Difference in the elevation of the ice surface from September 2011 to September 2017. B) Frequency distribution of differences in elevation of ice surface from 2011 and 2017.

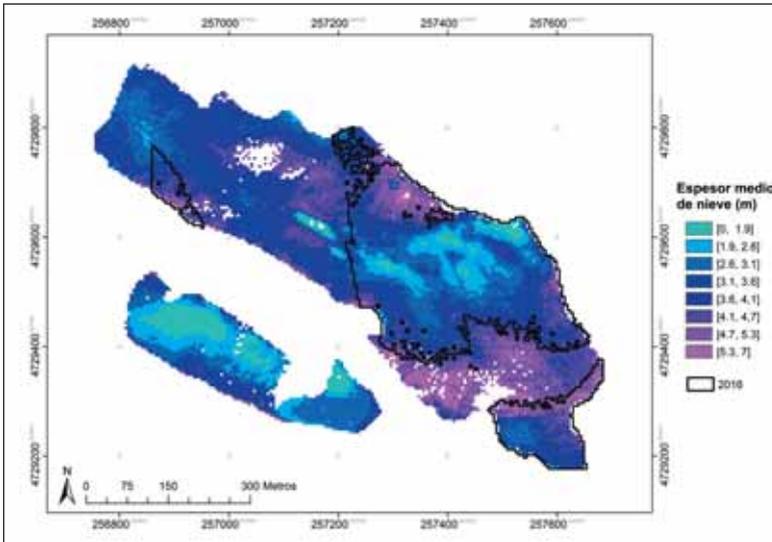


Figura 6. Acumulación media de nieve (metros) para los años 2014, 2015 y 2016. La línea negra indica el único sector en el que fue posible medir el espesor de nieve en el año 2016.

Figure 6. Average snow accumulation (m) for the years 2014, 2015 and 2017, and the area from which it was possible to retrieve snow depth data in 2016.

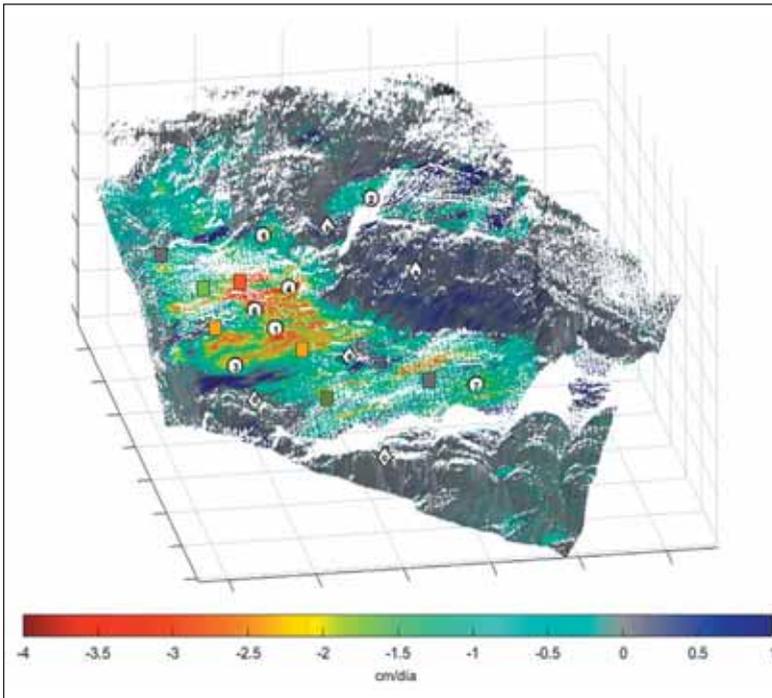


Figura 7. Mapa de velocidad del hielo (cm día^{-1}) obtenido a partir de las 71 imágenes de GBSAR. Los rectángulos muestran las velocidades medidas en las balizas de ablación durante el periodo 2014-2017.

Figure 7. Deformation velocity map (cm día^{-1}) obtained from the whole GB-SAR dataset (71 images). Numbers indicate the time series depicted in Figure 10. Rectangles inform of the average daily displacement (cm a^{-1}) measured in seven ablation stakes during four years (2014-2017) of observations (measured in September each year).

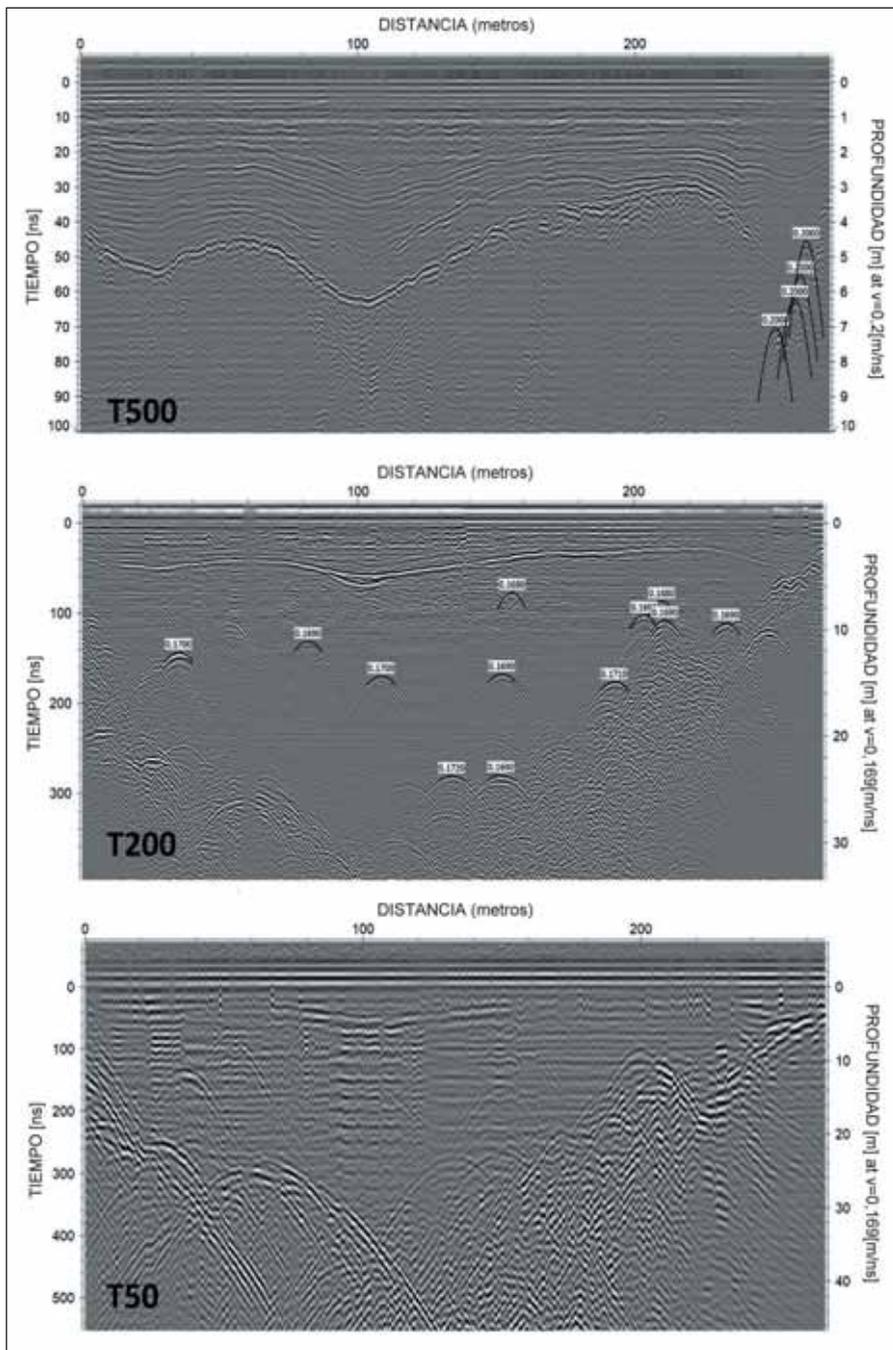


Figura 8. Radargramas obtenidos en primavera (30 abril / 1 mayo) con antenas de 500 (T500), 200 (T200) and 50 (T50) MHz.
Figure 8. Radargrams obtained in spring (30 April/1st May) with 500 (T500), 200 (T200) and 50 (T50) MHz antennae.

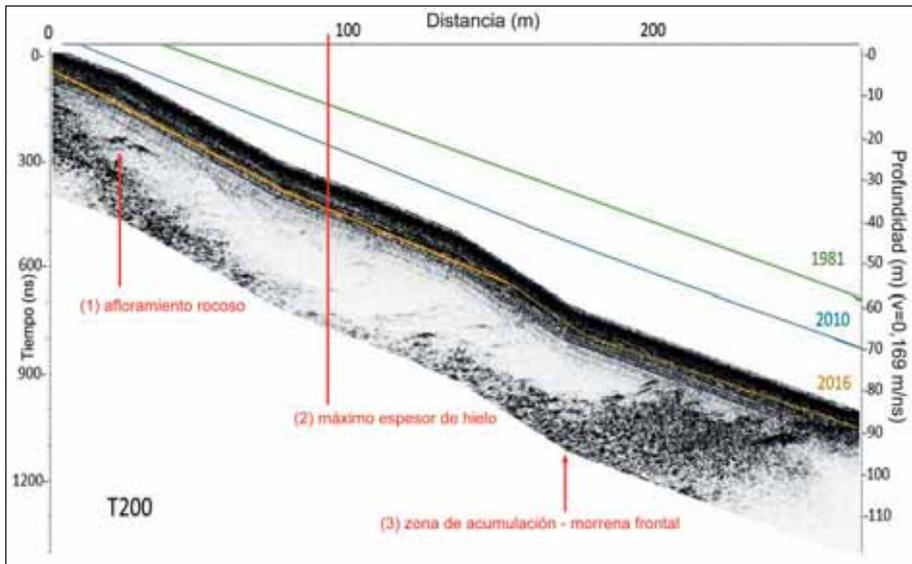


Figura 9. Estructura del hielo obtenida mediante postproceso del *radargrama* T200. Las líneas indican la altura a la que se encontraba la superficie del hielo en 1981, 2010 y 2016 (LOPEZ-MORENO *et al.*, 2016)

Figure 9. Structure of the glacier obtained from the *radargram* 200 (T200) MHz after post-processing from GPR survey conducted in spring (PIS in Figure 1). The estimated surface of the glacier from TLS data and previous geomatic analysis (LOPEZ-MORENO *et al.*, 2016) are also indicated.

procesado básico consistente en la corrección del decaimiento de energía. En función de las hipérbolas observadas a distintas frecuencias (200 y 500 MHz) se estimaron velocidades de $163 \pm 7 \text{ } \mu\text{s}^{-1}$ y $200 \pm 5 \text{ } \mu\text{s}^{-1}$ para hielo y nieve respectivamente, que permitieron obtener un máximo espesor de hielo de $25,8 \pm 1,6 \text{ m}$

La Figura 9 muestra una imagen más detallada de la estructura interna del glaciar a partir la aplicación de filtros adicionales, corrección topográfica y migración. De esta forma es posible identificar tres capas desde la superficie hasta la base, que corresponderían al manto de nieve, neviza (transición entre nieve y hielo) y hielo puramente glaciar. La estructura de la base sugiere la existencia de depósitos de detritus que también están presentes en el interior del cuerpo principal de hielo. La figura también muestra los perfiles del hielo estimados para 1981, 2010 y la superficie actual, pudiéndose comprobar que desde 1981 se ha fundido prácticamente tanto hielo como el que queda actualmente.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Cambios de espesor de hielo del glaciar

A pesar de que la técnica de TLS a distancias tan grandes ofrece una serie de incertidumbres (REVUELTO *et al.*, 2014), los resultados han mostrado de forma clara que la disminución de espesor de hielo es muy variable de un año para otro. Desde 2011 ha habido tres años en los que se ha perdido de media aproximadamente 1,5 m, mientras que durante otros años el glaciar ha permanecido bastante estable o incluso ha mostrado un ligero incremento. En total se han perdido 6.1 m durante el periodo 2011-2017. La acumulación de nieve sobre el glaciar, si bien es variable, no fluctúa tanto como lo han hecho las pérdidas de espesor de hielo, lo que parece indicar que el balance de masa del glaciar se encuentra más controlado por las condiciones climáticas durante el periodo de fusión, que de la acumulación de nieve. En cualquier caso, la acumulación de nieve también tiene importancia en el balance de masa y, de hecho,

las zonas con menor acumulación de nieve debido a la acción del viento son algunas de las que han mostrado un mayor descenso en el volumen de hielo.

Movimiento del glaciar

La técnica de GB-SAR ha mostrado poseer un gran potencial para medir la velocidad de movimiento del hielo glaciar. Se han medido velocidades de entre 2.5 y 4 cm día⁻¹ en los sectores más dinámicos, y también se han observado zonas en las que el hielo ha permanecido prácticamente estático. La menor velocidad del hielo medida en las estacas de ablación confirma una ralentización del movimiento del hielo durante los meses de invierno (BURGESS *et al.*, 2013; SATYABALA, 2016). Los resultados también han mostrado que uno de los puntos débiles de la técnica es la dependencia de la geometría de la posición de adquisición, siendo necesario tener una vista muy frontal del glaciar para obtener resultados satisfactorios. También se ha podido comprobar la dificultad de obtener información de calidad durante las horas del día cuando el agua circula por la superficie del glaciar.

Espesor de hielo y estructura interna

Las condiciones de escasa circulación de agua por el glaciar permitieron obtener *radargramas* de alta calidad, pero con la limitación de poder hacer un único perfil debido a las muy adversas condiciones meteorológicas. El perfil realizado se cree que cubre un área de espesor intermedio dentro del glaciar, así que el espesor puntual medido de 25 m podría ser fácilmente superable en la zona oriental del glaciar donde mediciones preliminares apuntan a espesores de 45-50 m. Las características de transmisividad de ondas obtenidas en el glaciar son similares a las obtenidas en otros glaciares templados del planeta (DANIELS 1996; BRANDT *et al.*, 2007).

Comportamiento actual del glaciar y perspectivas futuras

En conjunto, los resultados evidencian que el glaciar se encuentra en un estado de evidente degra-

dación. Para el periodo 1981-2010, LÓPEZ-MORENO *et al.* (2016) estimaron unas pérdidas anuales de espesor de $0,58 \pm 0,27$ m a⁻¹. Así, los 6,1 m de pérdida para el periodo 2011-2017 sugiere una clara aceleración en las pérdidas (1,02 m a⁻¹), con sectores donde éstas han sumado entre 10 y 15 m. Las tasas de pérdida de hielo en Monte Perdido son muy similares a las indicadas por MARTI *et al.* (2015) para el glaciar de Ossue (Macizo de Vignemale), con pérdidas de hielo de entre 20 y 50 m para el periodo 1983-2013. Siendo que en la mayor parte del glaciar los espesores no superan los 30 m, se podría asumir que el glaciar puede llegar a desaparecer casi totalmente en algún momento de los próximos 50 años. La hipótesis derivada de este trabajo sobre una mayor influencia de las temperaturas estivales (que han aumentado de forma drástica en las últimas décadas) respecto a la precipitación de los meses fríos (que ha permanecido estable) sugieren un escenario más pesimista, pues las proyecciones climáticas para las próximas décadas en el Pirineo apuntan hacia un acusado incremento térmico durante la estación cálida (LÓPEZ-MORENO *et al.*, 2011). La falta de movimiento de amplias partes del glaciar, y la existencia de importantes depósitos de detritos dentro del cuerpo de hielo también se suman a las evidencias de que el glaciar se encuentra en una fase muy próxima a la desaparición. Los resultados de las tres técnicas apuntan a que el sector occidental del glaciar será el primero en desaparecer, siendo la parte más elevada y al este del glaciar actual la que tiene más posibilidades de permanecer durante un periodo temporal más prolongado

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Organismo Autónomo Parques Nacionales, la financiación del proyecto: «El glaciar de Monte Perdido: Monitorización y estudio de su dinámica actual y procesos criosféricos asociados como indicadores de procesos de cambio global (844/2013)». También agradecemos de forma especial la atención y apoyo que nos prestó en todo momento el personal del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRADFORD, J.H.; HARPER, J.T. 2005 Wave field migration as a tool for estimating spatially continuous radar velocity and water content in glaciers. *Geophysical Research Letters*, 32, L08502: 1-4.
- BRANDT, O.; LANGLEY, K.; KOHLER, J.; HAMRAN, S.E. 2007. Detection of buried ice and sediment layers in permafrost using multi-frequency ground penetrating radar: A case examination on Svalbard. *Remote Sensing of Environment* 111: 212-227.
- BURGESS, E.W.; LARSEN, C.F.; FORSTER, R. 2013. Summer melt regulates winter glacier flow speeds throughout Alaska. *Geophys. Res. Lett.*, 40: 6160-6164.
- DANIELS, S. 1996. Surface Penetrating Radar. The Institution of Electrical Engineers. IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics. Series 6.
- DEL RÍO, L.M.; RICO, I.; SERRANO, E.; TEJADO, J.J. 2014. Applying GPR and Laser Scanner Techniques to Monitor the Ossoue Glacier (Pyrenees). *J. Environ. Eng. Geoph.* 19 (4): 239-248.
- DEMATTEIS, N.; LUZI, G.; GIORDAN, D.; ZUCCA, F.; ALLASIA, P. 2017. Monitoring Alpine glacier surface deformations with GB-SAR. *Remote Sens. Lett.*, 8(10): 947-956.
- GARCÍA-RUIZ, J.M.; PALACIOS, D.; ANDRÉS, N.; VALERO-GARCÉS, B.; LOPEZ-MORENO, J.I.; SANJUÁN, Y. 2014. Holocene and 'Little Ice Age' glacial activity in the Marboré Cirque, Monte Perdido Massif, Central Spanish Pyrenees. *Holocene* 24: 1439-1452. <https://doi.org/10.1177/0959683614544053>.
- FISCHER, M.; HUSS, M.; KUMMERT, M.; HOELZLE, M. 2016. Application and validation of long-range terrestrial laser scanning to monitor the mass balance of very small glaciers in the Swiss Alps. *Cryosphere* 10: 1279-1295.
- GRUNEWALD, K.; SCHEITHAUER, J. 2010. Europe's 2010 southernmost glaciers: response and adaptation to climate change. *J. Glaciol.*, 56 (195): 129-142.
- JULIÁN, A.; CHUECA, J. 2007 Pérdidas de extensión y volumen en los glaciares del macizo de Monte Perdido (Pirineo central español): 1981-1999. *Boletín Glaciológico Aragonés*, 8, 31-60.
- LÓPEZ-MORENO, J.I.; VICENTE-SERRANO, S.M.; MORAN-TEJEDA, E.; ZABALZA, J.; LORENZO-LACRUZ, J.; GARCÍA-RUIZ, J.M. 2011. Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15: 311-322.
- LÓPEZ-MORENO, J.I.; REVUELTO, J.; RICO, I.; CHUECA-CÍA, J.; JULIÁN, A.; SERRETA, A.; SERRANO, E.; VICENTE-SERRANO, S.M.; AZORÍN-MOLINA, C.; ALONSO-GONZÁLEZ, E.; GARCÍA-RUIZ, J.M. 2016. Thinning of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981. *The Cryosphere* 10: 681-694.
- LÓPEZ-MORENO, J.I.; REVUELTO-BENEDÍ, J.; ALONSO-GONZÁLEZ, E.; SANMIGUEL-VALLELADO, A.; FASSNACHT, S.R.; DEEMS, J.; MORÁN-TEJEDA, E. 2017. Using very long-range terrestrial laser scanner to analyse the temporal consistency of the snowpack distribution in a high mountain environment. *Journal of Mountain Science* 14 (5): 823-842.
- LÓPEZ-MORENO, J.I.; ALONSO-GONZÁLEZ, E.; MONTSERRAT, O.; DEL RÍO, L.M.; OTERO, J.; LAPAZARAN, J.; LUZI, G.; DEMATTEIS, N.; SERRETA, A.; RICO, I.; SERRANO-Cañadas, E.; BARTOLOMÉ, M.; MORENO, A.; BUISAN, S.; REVUELTO, J. 2019. Ground-based remote sensing techniques for diagnosis of the current state and recent evolution of the Monte Perdido Glacier, Spanish Pyrenees. *Journal of Glaciology* 65 (249):85-100.
- MONSERRAT, O.; CROSETTO, M.; LUZI, G. 2014. A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement. *ISPRS J. Photogramm.* 93, 40-48.

- MOORE, J.C.; PÄLLI, A.; LUDWIG, F.; BLATTER, H.; JANIA, J.; GADEK, B.; GLOWACKI, P.; MOCHNACKI, D.; ISAKSSON, E. 1999. High-resolution hydrothermal structure of Hansbreen, Spitsbergen, mapped by ground-penetrating radar. *J. Glaciol.* 45 (151): 524-532.
- REVUELTO, J.; LÓPEZ-MORENO, J.I.; AZORÍN-MOLINA, C.; ZABALZA, J.; ARGUEDAS, G.; VICENTE-SERRANO, S.M. 2014. Mapping the annual evolution of snow depth in a small catchment in the Pyrenees using the long-range terrestrial laser scanning. *J. Maps*, 10 (3): 359-373.
- RICO, I.; IZAGUIRRE, E.; SERRANO, E.; LÓPEZ-MORENO, J.I. 2017. Current glacier area in the Pyrenees: an updated assessment 2016. *Pirineos* 172: e029.
- SATYABALA, S.P. 2016. Spatiotemporal variations in surface velocity of the Gangotri glacier, Garhwal Himalaya, India: Study using synthetic aperture radar data. *Remote Sens. Environ.* 181: 151-161.
- TARCHI, D.; RUDOLF, H.; LUZI, G.; CHIARANTINI, L.; COPPO, P.; SIEBER, A.J. 1999. *SAR interferometry for structural changes detection: a demonstration test on a dam*. In: Proc. IGARSS Hamburg, Germany, pp. 1522-1524.