

ESTIMACIÓN DE UNA SERIE TEMPORAL DE CUBIERTAS DE NIEVE A PARTIR DE REGISTROS TÉRMICOS DE SUELO Y TELEDETECCIÓN EN UN ENTORNO DE ALTA MONTAÑA DE LA CORDILLERA CANTÁBRICA (N DE LA PENÍNSULA IBÉRICA)

Adrián MELÓN-NAVA¹, Javier SANTOS-GONZÁLEZ¹, José María REDONDO-VEGA¹, Rosa Blanca GONZÁLEZ-GUTIÉRREZ¹, Amelia GÓMEZ-VILLAR¹
(1). Departamento. de Geografía y Geología, Campus de Vegazana s/n, Universidad de León, León, España. 24071.

amelon@unileon.es

RESUMEN

El análisis de la cubierta de nieve adquiere especial importancia en el estudio del clima de entornos de alta montaña, donde la topografía local influye notablemente sobre los registros térmicos, siendo uno de los principales condicionantes del régimen térmico del suelo, que resulta fundamental en el desarrollo de diversos procesos geomorfológicos y periglaciares.

El aislamiento que la nieve produce en determinadas condiciones entre las temperaturas superficiales de suelo y las de aire permite estimar durante qué periodos los emplazamientos se encuentran bajo una cubierta importante de nieve.

El objetivo del trabajo ha sido estimar la cubierta de nieve a partir de una serie de 14 años (2006-2020) de temperaturas superficiales de suelo y aire mediante el cálculo de umbrales. Se analizaron registros de 10 localizaciones obtenidas mediante termorregistradores en el circo glaciar de Hoyo Empedrado, situado a más de 2200 m.s.n.m. en la Cordillera Cantábrica.

La Teledetección sirve de fuente de validación del método anterior mediante el cálculo de índices espectrales, útiles para el estudio de la cubierta de nieve en áreas de montaña de difícil acceso, aunque limitada por la presencia de nubes.

Se han observado diferencias en los registros de cada emplazamiento, explicados por el papel que la topografía juega sobre la distribución de la nieve. Así, en el surco del glaciar rocoso presente en el circo se ha registrado una media (por año hidrológico) de 266 días de cubierta de nieve, mientras que en la vertiente de solana la media es de 126 días.

Palabras clave: Cubierta de nieve, Teledetección, Régimen térmico de suelos, Cordillera Cantábrica.

ABSTRACT

Snow cover analysis is relevant in the study of high mountain environments climate, where the local topography has a significant influence on the thermal records, being one of the main determinants of the ground thermal regime, which is fundamental in the development of various geomorphological and periglacial processes.

The aim is to estimate snow cover from a 14-year series (2006-2020) of ground surface and air temperatures at 10 locations obtained by dataloggers in the glacial

cirque of Hoyo Empedrado, located at more than 2200 m.a.s.l. in the Cantabrian Mountains.

The isolation that snow produces under certain conditions between ground and air temperatures allows to estimate snow-covered conditions. Remote sensing is used as validation by calculating spectral indexes from Sentinel-2 satellite images. It is a useful tool for the study of snow in mountainous areas that are difficult to access, although it is limited during long periods with cloud cover.

Differences have been observed in the records for each site, explained by the role that topography plays in the snow distribution. For example, in the furrow of the rock glacier, an average (per water year) of 266 days of snow cover has been recorded, while on the sunny slope the average is 126 days.

Key words: Snow cover, Remote Sensing, Ground Thermal Regime, Cantabrian Mountains.

1. INTRODUCCIÓN

La nieve es un meteoro de gran importancia en los sistemas montañosos de la Península Ibérica, desde el punto de vista hidrológico o biogeográfico. Tiene gran influencia en algunos procesos geomorfológicos y su acumulación en algunas zonas puede suponer un riesgo natural, en forma de aludes o avalanchas.

El estudio de la nieve en áreas montañosas ha sido considerado mediante múltiples enfoques y a diferentes escalas. En Pirineos se han analizado el impacto del cambio climático en la criosfera, analizando cubiertas de nieve en distintas temporadas y relacionándolo con patrones de teleconexión (Bonsoms et al., 2021) y se han realizado predicciones para las próximas décadas en un contexto de progresivo calentamiento que sugieren cambios que afectarían notablemente a la duración de la cubierta de nieve y su equivalente en agua (*SWE*) (López-Moreno et al., 2008).

Estudios desarrollados en la Cordillera Cantábrica han destacado su importancia como agente morfogenético, capaz de generar cambios en los patrones de escorrentía y procesos de soliflucción por acción de la fusión de la nieve (Pisabarro, 2020; Serrano et al., 2018). González Trueba y Serrano (2010) describen la dinámica de la nieve en Picos de Europa, destacando su papel como agente de modelado y definiendo las formas de relieve que pueden generar los nichos de nivación en diferentes ambientes. La Teledetección, entendida como la técnica aplicada para adquirir información de la superficie terrestre a partir de sensores aéreos o espaciales (Chuvieco Salinero, 2006), se plantea en este estudio como una herramienta de validación para la metodología propuesta a partir de los registros térmicos de suelos. Resulta de gran interés para la obtención de información en zonas remotas o de difícil acceso, y puede ser aplicada a grandes extensiones o a escala local, como en este caso. Esta técnica ha sido utilizada, por ejemplo, en Sierra Nevada para la detección de presencia de cubiertas de nieve a través de sensores térmicos (Santos, 2016).

En este trabajo, se plantea el estudio de la cubierta de nieve en un circo glaciar de la Cordillera Cantábrica, apoyándose en registros térmicos superficiales de suelos y en el análisis de imágenes satelitales.

1.1. Área de estudio

Las mediciones de temperatura se han llevado a cabo en el sector central de la Cordillera Cantábrica (Figura 1), en el Macizo de Fuentes Carrionas (o Macizo de Peña Prieta), que comprende parte de las provincias de León, Palencia y Cantabria. Es, junto al sector de Picos de Europa, el de mayor altitud de la Cordillera Cantábrica, alcanzando la cima más elevada los 2539 m en Peña Prieta.

En la confluencia de las tres demarcaciones se encuentra el Mojón de las Tres Provincias (2499 m) y muy próximo hacia el sur el Alto de Fuentes Carrionas (2421 m). Las vertientes occidentales de estos picos, junto con la vertiente norte de las Agujas de Cardaño (2388 m) delimitan el circo glaciar que se generó durante las glaciaciones pleistocenas en la vertiente leonesa. Durante el Cuaternario, la presencia de fluctuaciones climáticas dio lugar a varios periodos de glaciaciones intercalados con periodos interglaciares afectando, al menos la última de ellas a la Cordillera Cantábrica (Oliva et al., 2022). Así, el relieve se ha modelado a partir de varias acciones morfogenéticas. La acción glaciar tuvo como resultado la formación de los circos por acción de la abrasión que la masa helada acumulada produjo en las paredes montañosas (Pellitero, 2022; Santos-González et al., 2022). Desde los circos se formaron importantes lenguas de hielo en todos los valles del macizo. Tras la retirada del hielo, la dinámica paraglaciar y los agentes modeladores del relieve pasan a dismantelar parcialmente las formas glaciares (Redondo Vega et al., 2010). La acción de los agentes fluviales y la dinámica de vertientes, comprendidos en un ambiente periglaciar, han dado como resultado la formación de glaciares rocosos, como los que ocupan el fondo del circo de Hoyo Empedrado (Redondo-Vega et al., 2010; Pellitero et al., 2011; Gómez-Villar et al., 2011), canchales, terracitas o el desarrollo de procesos de soli-gelifluxión.

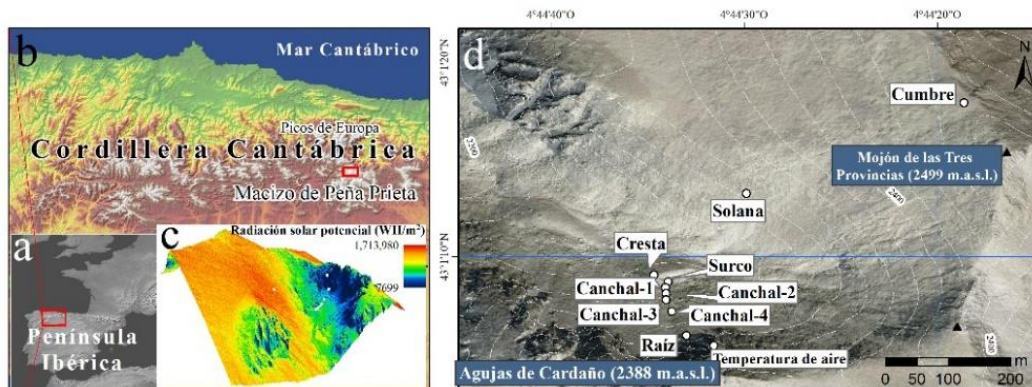


Figura 1. a) Localización del área de estudio en la Península Ibérica; (b) Localización en la Cordillera Cantábrica. c) Representación 3D de la radiación solar anual potencial d) Distribución de los termorregistradores en el circo glaciar

2. MÉTODOS

2.1. Obtención de los registros térmicos de suelo

La obtención de las series de temperatura de la superficie de suelos se realizó en diez emplazamientos del circo glaciar de Hoyo Empedrado (vertiente leonesa del Macizo de Peña Prieta) mediante termorregistradores o *dataloggers*.

Los datos de temperatura de suelo han sido registrados desde noviembre de 2006 hasta septiembre de 2020, con intervalo horario en los diez emplazamientos, aunque durante algunos periodos hay registros discontinuos. La mayoría de estos emplazamientos se localizan en diferentes puntos del glaciar rocoso (surco, cresta, raíz y cuatro sensores en diferentes partes del depósito de derrubios groseros), mientras que el resto están localizados en otros puntos del circo (Figura 2): uno próximo a la cumbre del circo, otro en la ladera de solana y el último en un sector elevado y bien ventilado de umbría, que mide las temperaturas de aire. Se encuentran a profundidades desde 5 cm en la solana y la cumbre a 100 cm en el canchal-3.



Figura 2. Localización de termorregistradores en las vertientes de umbría y solana

2.2. Estimación de cubiertas de nieve a partir de los registros térmicos de suelo

Los registros térmicos del suelo han sido utilizados para estimar la presencia de cubiertas de nieve. Para ello se han escogido umbrales a partir de la temperatura media diaria y la amplitud térmica diaria: se han definido como días de cubierta de nieve aquellos con una temperatura media diaria $< 1^{\circ}\text{C}$, ya que se ha comprobado mediante Teledetección, trabajo de campo y trabajos previos (Santos-González et al., 2009), que las localizaciones tienden a mantener la temperatura entre 0°C y 1°C cuando se encuentran bajo la cubierta de nieve. Además, estos días deben cumplir con la condición de que su amplitud térmica diaria fuera menor de $0,5^{\circ}\text{C}$.

2.3. El uso de imágenes satelitales como herramienta de validación

La Teledetección participa en este estudio a partir de imágenes de los satélites Sentinel-2, ya que es la plataforma que mejor cumple con las resoluciones deseadas: tienen un periodo de revisita de unos 5 días, una resolución temporal de 20 metros para el índice espectral calculado y recogen imágenes desde 2015.

Se han recopilado 40 imágenes de Sentinel-2, que abarcan fechas desde abril de 2016 a agosto de 2019, teniendo en cuenta que el área de estudio estuviera libre de nubes y tratando así de obtener, al menos una imagen mensual.

Para cada imagen se aplica el índice diferencial normalizado de nieve (NDSI en inglés: *Normalized Difference Snow Index*), con una resolución de 20 m (Figura 3).

$$\text{NDSI} = \frac{\rho(\text{VIS}) - \rho(\text{SWIR})}{\rho(\text{VIS}) + \rho(\text{SWIR})} = \frac{B_3 - B_{11}}{B_3 + B_{11}}$$

Donde ρ es la reflectancia, VIS es la banda verde del canal visible y SWIR es la banda infrarroja cercana. En Sentinel-2 se corresponden con las Bandas 3 y 11, respectivamente.

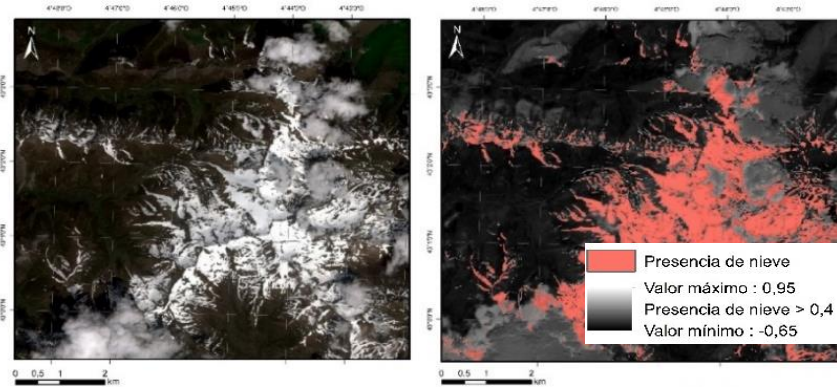


Figura 3. Cálculo del índice NDSI en la zona de estudio el 17/05/2018

Los píxeles con un valor superior a 0,4 serán clasificados como cubiertos por nieve. Este valor es utilizado en otros estudios (Shea, 2017) y se ha comprobado que funciona correctamente en la zona de estudio. Se han obtenido observaciones puntuales para validar los periodos de cubiertas de nieve calculados a partir del establecimiento de umbrales térmicos para las series de datos de temperatura.

3. RESULTADOS

El cálculo de los días de cubiertas de nieve a partir de los registros térmicos, aplicando los umbrales antes descritos, han sido comparados con el mismo periodo para las observaciones recogidas por las imágenes de satélite, pudiendo así comparar un total de 40 situaciones. De esta manera, se ha obtenido un coeficiente de determinación de $R^2= 0,73$ entre las observaciones recogidas por ambos métodos. La Figura 4 muestra la comparación entre ambos métodos para los emplazamientos en los que estaban disponibles los registros térmicos de suelo para el periodo de 2016 a 2019.

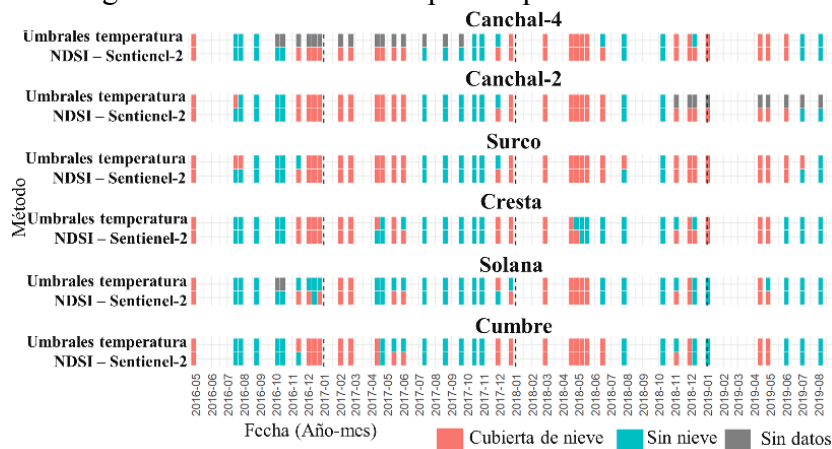


Figura 4. Estimación de los días de cubierta de nieve en el periodo 2016-2019 a partir de umbrales de temperatura de superficie de suelo e imágenes de satélite

Algunos emplazamientos sufrieron interrupciones en el registro de datos de temperatura, por lo que en esos casos ambos métodos no pueden ser comparados.

A partir de la metodología propuesta, existen situaciones en que se producen discordancias entre ambos métodos para ciertos emplazamientos. La figura 5 recoge dos situaciones en diferentes momentos del año. En el caso de la imagen de diciembre de 2018, la mayor parte del área del circo se encontraba bajo la cubierta de nieve, según recoge la aplicación del índice NDSI a la imagen de Sentinel-2 de dicha jornada. En este caso, existe concordancia con el método de los umbrales de temperatura en tres emplazamientos, mientras que en la cresta del glaciar rocoso y en el canchal-4, este método no detecta la presencia de la cubierta de nieve al ser la amplitud térmica diaria en ambos emplazamientos superior a 0,5°C. Este hecho indica que, a pesar de que la imagen satelital sí refleja la presencia de cubierta de nieve sobre estos emplazamientos, dicha cubierta no era lo suficientemente espesa como para aislar la temperatura superficial del suelo con la del aire, por lo que no se produce una estabilización de la temperatura en el conjunto del día. Por tanto, la cubierta de nieve no es detectada por el método de los umbrales en esta situación.

En el caso de la imagen de junio de 2019, la cubierta de nieve ocupa parcialmente el área de estudio, manteniéndose principalmente en puntos de la vertiente norte. En esta situación, existe concordancia en la detección de la cubierta de nieve entre ambos métodos y la presencia de nieve tiene un claro impacto, dando lugar a diferencias de temperatura de la superficie del suelo entre emplazamientos próximos, como en el caso del surco y la cresta del glaciar rocoso.

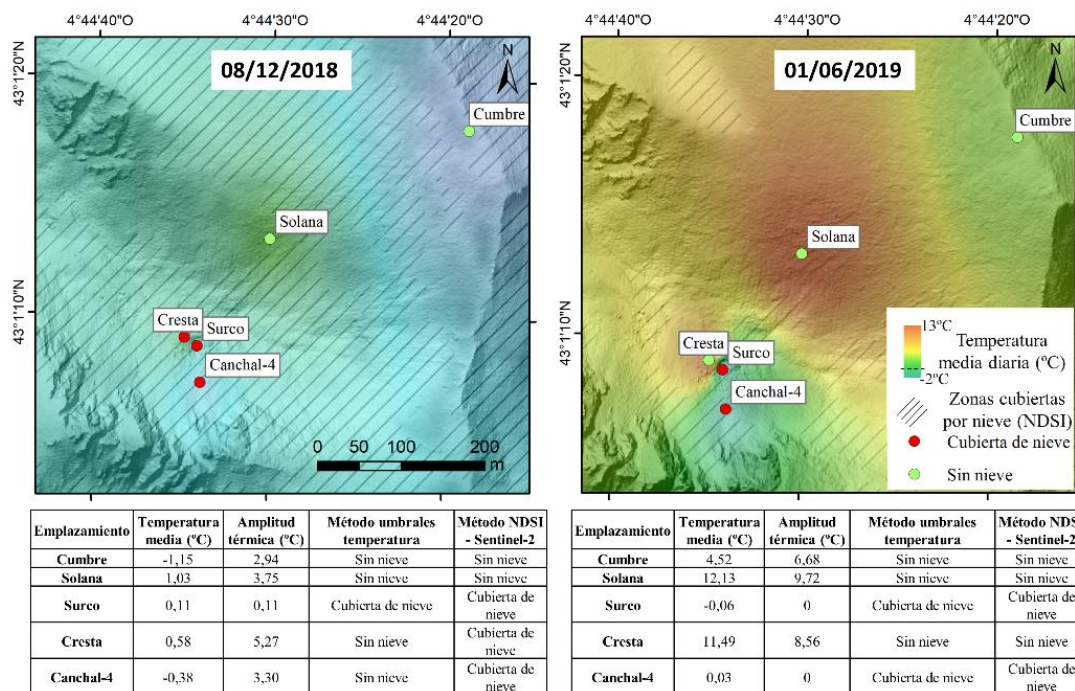


Figura 5. Mapa de temperatura media diaria para dos situaciones contrastadas y delimitación de zonas cubiertas por nieve a partir del índice NDSI. Las tablas inferiores reflejan la comparación entre los dos métodos para la detección de nieve.

La metodología basada en umbrales ha sido aplicada al resto de la serie de temperaturas de suelo (Figura 6), de manera que se observan diferencias en los periodos de establecimiento y fusión de la nieve entre emplazamientos, así como un distinto grado de estabilidad en la presencia del manto nivoso.

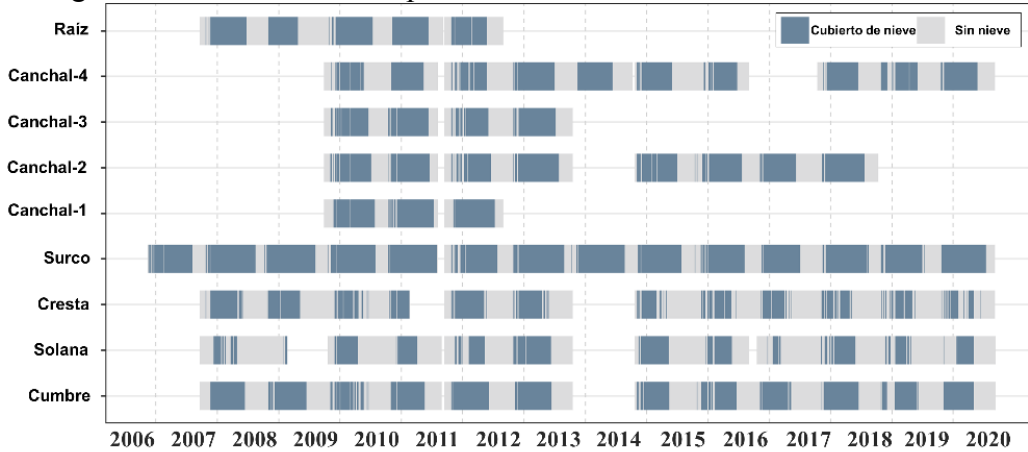


Figura 6. Resultado de aplicar la metodología de los umbrales de temperatura para todo el periodo de recogida de datos mediante termorregistradores (2006-2020)

Los registros (discontinuos algunos años) muestran un distinto grado de estabilidad del manto nivoso entre emplazamientos. La cubierta de nieve es más persistente en el surco del glaciar rocoso que en otros emplazamientos, ya que la propia topografía favorece una mayor acumulación de la nieve (Figura 7) y tiende a mantenerse, de media, durante 266 días al año, favorecida además por una baja radiación solar potencial. Le siguen los emplazamientos situados en la ladera de umbría, situados en diversas partes del canchal que cubre la zona y sobre la raíz del glaciar rocoso. Tienden a mantener la cubierta de nieve, de media para los años analizados, entre 190 y 240 días al año. Por el contrario, los emplazamientos de la cresta del glaciar rocoso y la vertiente de solana mantienen la nieve durante menos tiempo, en torno a 130-150 días al año, estando muy influenciada por la retirada de la cubierta de nieve por acción del viento en el caso de la cresta, y por una elevada radiación solar potencial en la vertiente de solana.

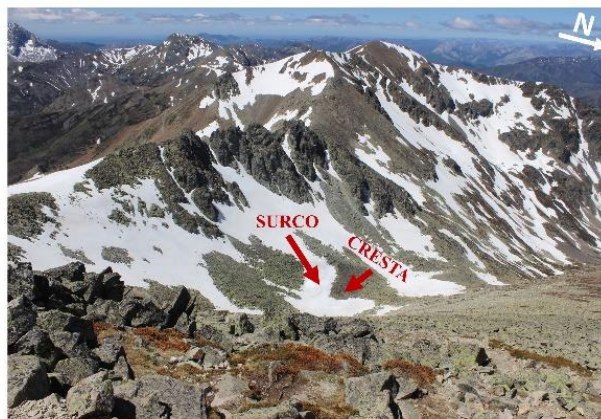


Figura 7. Ejemplo de presencia irregular de las cubiertas de nieve, que tiende a mantenerse durante más tiempo en el sector deprimido (surco) del glaciar rocoso

La relación de la cubierta de nieve con otras variables topoclimáticas (Figura 8) ha sido analizada en Melón-Nava et al. (2022). Está íntimamente relacionada con los registros de temperaturas medias anuales, amplitudes térmicas medias anuales y con otros parámetros como los ciclos de hielo-deshielo, muy importantes para la generación de algunos procesos periglaciares.

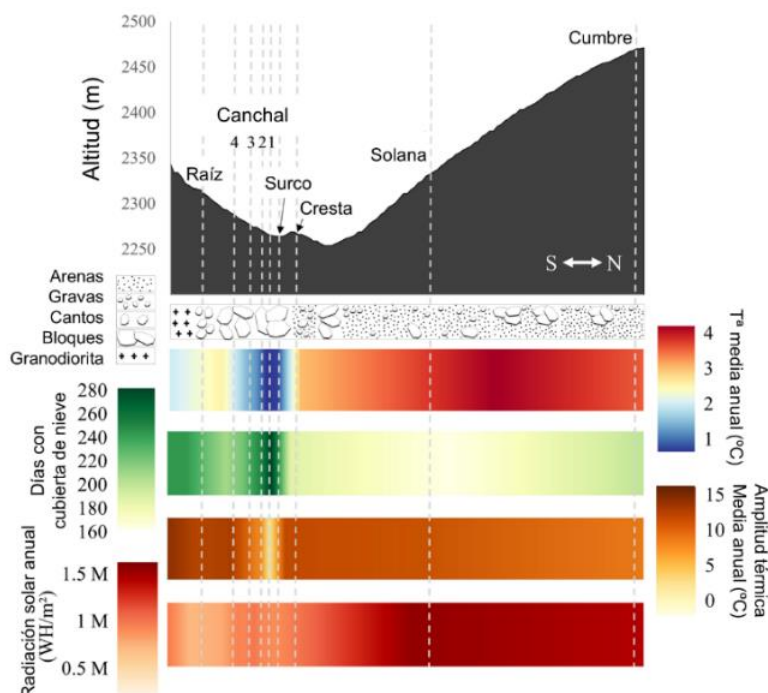


Figura 8. Perfil topográfico del área estudiada y representación de algunas variables topoclimáticas

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El registro de series continuas de temperaturas de suelo es utilizado para estimar la presencia de cubiertas de nieve. La presencia de periodos de temperatura de suelo muy estables indica su aislamiento respecto de la temperatura de aire, como consecuencia del establecimiento de una capa de cubierta de nieve lo suficientemente espesa. Existen situaciones en que se producen discordancias entre la detección de la cubierta de nieve a partir de la aplicación de umbrales de temperatura y el uso del índice espectral NDSI. En los casos en que la imagen de satélite sí registra cubierta de nieve en un emplazamiento concreto pero la temperatura no consigue estabilizarse durante ese día, se produce una discordancia que indica que la cubierta de nieve no es lo suficientemente espesa como para conseguir aislar completamente la temperatura superficial del suelo con la temperatura del aire, generando amplitudes térmicas mayores que las que el umbral propuesto tiende a clasificar como cubierta de nieve. Además, hay que tener en cuenta que la limitación del tamaño de píxel en las imágenes satelitales puede producir algunos errores en la detección de la cubierta de nieve en emplazamientos en zonas límite de las cubiertas. Este es el principal origen de discordancias en aquellas situaciones en que la temperatura de la superficie del suelo

de un emplazamiento se mantiene estable, pero la cubierta de nieve no es detectada por el cálculo del índice espectral.

La Teledetección es utilizada como una útil herramienta para el seguimiento de procesos en entornos como el circo glaciar de Hoyo Empedrado, un espacio de alta montaña y difícil acceso que permite la monitorización de las cubiertas de nieve.

Es destacable la ventaja que supone disponer de un registro continuo de cubiertas a partir de los registros térmicos, a diferencia de las imágenes satelitales, que tan solo nos pueden ofrecer registros en un momento concreto. Por el contrario, las imágenes satelitales permiten analizar toda la extensión de un área de estudio concreta, frente a las observaciones locales o puntuales de los registros térmicos.

La combinación entre ambos métodos resulta de gran utilidad para validar la presencia (a escala local) de cubiertas de nieve que producen aislamiento sobre las temperaturas de la superficie del suelo y para diferenciar estas de las cubiertas superficiales.

La cubierta de nieve tiene importantes implicaciones en los registros de las temperaturas del suelo, lo que favorece grandes diferencias entre emplazamientos del circo glaciar de Hoyo Empedrado. La cubierta de nieve se mantiene de manera heterogénea entre localizaciones del circo glaciar en función de la topografía local. Sectores deprimidos y con una baja radiación solar potencial, como el surco del glaciar rocoso, mantiene la cubierta, de media, durante más de 8 meses al año, favoreciendo que la temperatura media anual sea de tan solo 0,3°C.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del Proyecto LE080G19 (*Significado paleo-ambiental y relación con el cambio global de los glaciares rocosos de la Cordillera Cantábrica: datación relativa y análisis de la estructura interna mediante tomografía eléctrica*), financiado por la Junta de Castilla y León, así como de los proyectos previos CGL2006-07404 (Ministerio de Educación y Ciencia) y LE020A07 (Junta de Castilla y León).

Adrián Melón-Nava es Personal Investigador Predoctoral en Formación con un contrato FPU del Ministerio de Universidades (FPU20/01220).

REFERENCIAS

Bonsoms, J., Gonzalez, S., Prohom, M., Esteban, P., Salvador-Franch, F., López-Moreno, J. I., & Oliva, M. (2021a). Spatio-temporal patterns of snow in the Catalan Pyrenees (NE Iberia). *International Journal of Climatology*.

<https://doi.org/10.1002/joc.7147>

Chuvieco Salinero, E. (2006). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio* (2ª ed. [act.]). Barcelona: Ariel.

Gómez-Villar, A.G., González-Gutiérrez, R.B., Redondo-Vega, J.M., Santos-González, J. (2011): «Distribution of relict rock glaciers in the Cantabrian Mountains (León, Spain)». *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37 (2): 49-80.

<http://dx.doi.org/10.18172/cig.1256>

López-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M. & Alvera, B. (2008). Sensitivity of the snow energy balance to climatic changes: prediction of snowpack in the Pyrenees in the 21st century. *Climate Research*, 36 (3): 203-217.

<http://dx.doi.org/10.3354/cr00747>

Melón-Nava, A., Santos-González, J., María Redondo-Vega, J., Blanca González-Gutiérrez, R., & Gómez-Villar, A. (2022). Factors influencing the ground thermal regime in a mid-latitude glacial cirque (Hoyo Empedrado, Cantabrian Mountains, 2006–2020). *CATENA*, 212, 106110.

doi: <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2022.106110>

Oliva, M., Palacios, D., Fernández-Fernández, J. M., Andrés, N., Cacho, I., Cañedo, D. G., ... Woronko, B. (2021). *Iberia, Land of Glaciers: How The Mountains Were Shaped By Glaciers*. (M. Oliva, D. Palacios, & J. M. Fernández-Fernández, Eds.). <https://doi.org/10.1016/C2019-0-03497-8>

Pellitero Ondicol, R.P., Cañadas, E.S., Trueba, J.J.G. (2011): «Glaciares rocosos del sector central de la Montaña Cantábrica: indicadores paleoambientales». Cuadernos de investigación Geográfica (37): 119-144. <http://dx.doi.org/10.18172/cig.1259>

Pellitero, R. (2022). Chapter 4.5 - The glaciers of the Montaña Palentina. In M. Oliva, D. Palacios, & J. M. Fernández-Fernández (Eds.), *Iberia, Land of Glaciers* (pp. 179–199). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00009-8>

Pisabarro, A. (2020). Snow cover as a morphogenic agent determining ground climate, landforms and runoff in the Valdecebollas massif, Cantabrian Mountains. *Geographical Research Letters*, 46(1), 81–102. <https://doi.org/10.18172/cig.3823>

Redondo Vega, J. M., Gómez-Villar, A., González Gutiérrez, R. B., & Santos González, J. (2010): *Los glaciares rocosos de la Cordillera Cantábrica*. Universidad de León, Servicio de Publicaciones.

Santos, B.M. (2016). *Cubierta Nival y Temperaturas de Superficie en Sierra Nevada a través del tratamiento digital de imágenes de satélite*. Universitat de Barcelona.

Santos-González, J., González-Gutiérrez, R., Gómez-Villar, A., Redondo-Vega, J., 2009. Ground thermal regime in the vicinity of relict rock glaciers (Cantabrian Mountains, NW Spain). *Finisterra* 44. <https://doi.org/10.18055/finis1375>.

Santos-González, J., Redondo-Vega, J. M., Celis, A. G., González-Gutiérrez, R. B., & Gómez-Villar, A. (2022). Chapter 4.10 - The glaciers of the Leonese Cantabrian Mountains. In M. Oliva, D. Palacios, & J. M. Fernández-Fernández (Eds.), *Iberia, Land of Glaciers* (pp. 289–314). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00014-1>

Serrano Cañadas, E., Oliva, M., González-García, M., López-Moreno, J. I., González-Trueba, J., Martín-Moreno, R., Palma, P. (2018). Post-little ice age paraglacial processes and landforms in the high Iberian mountains: A review. *Land Degradation and Development*, 29(11), 4186–4208. <https://doi.org/10.1002/ldr.3171>

Shea, J. (2017): «Climate Change, Glacier Response, and Vegetation Dynamics in the Himalaya: Contributions Toward Future Earth Initiatives», *Mountain Research and Development* 37(3). <https://doi.org/10.1659/mrd.mm209>