

Caracterización de la distribución espacial y temporal del manto de nieve en una zona pirenaica de matorral con vehículos aéreos no tripulados y sensores térmicos de superficie

Pablo Domínguez Aguilar¹

¹ Graduado en Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales. Universidad de León. email: pdomia@estudiantes.unileon.es

Resumen

Los sistemas montañosos son un importante reservorio de agua para los ecosistemas y las actividades humanas en forma de nieve. El calentamiento global amenaza con alterar el equilibrio hidrológico de los sistemas montañosos, lo que puede provocar grandes problemas para satisfacer la demanda de agua en el futuro. En este trabajo se ha realizado la caracterización espacial y temporal del manto de nieve en una zona de nieves marginales del Pirineo Central. El estudio de estas zonas resulta de interés desde el punto de vista de la gestión hidrológica y se ha realizado mediante el análisis de datos térmicos obtenidos de sensores distribuidos en dos zonas del área de estudio y mediante la interpretación de mapas de nieve generados por fotogrametría de imágenes adquiridas por tres vehículos aéreos no tripulados (UAVs). Los datos térmicos de los sensores han proporcionado información valiosa para estudiar la variabilidad espacial y temporal de la nieve: se han observado fuertes diferencias en la dinámica nival en zonas muy próximas espacialmente debidas, por un lado, a la exposición solar y a los vientos dominantes y, por otro, a la interacción con la vegetación de la zona, compuesta por arbustos y árboles de bajo porte, aunque no se ha podido determinar exactamente el efecto de esta interacción. Por último, se proponen opciones de mejora para esta técnica.

Palabras clave

fotogrametría, gestión hidrológica, matorral, nieve marginal, sensores térmicos, sistemas montañosos

1. Introducción

Los sistemas montañosos desempeñan un papel fundamental en el ciclo hidrológico a nivel global: almacenan agua durante el invierno en forma de nieve y hielo para liberarla paulatinamente durante los meses cálidos. Este aporte de agua es fundamental para satisfacer la demanda hídrica de los sistemas naturales y las actividades humanas enmarcadas en la cuenca hidrológica (Viviroli *et al.*, 2007).

Debido al calentamiento global cada vez se acumula menos nieve durante el invierno y se funde antes. Esto supone una amenaza para la seguridad hídrica de las cuencas cuyo aporte de agua es dependiente de los sistemas montañosos, ya que los periodos de sequía estival se vuelven más intensos (Barnett *et al.*, 2005; Viviroli *et al.*, 2007). Diversos estudios indican que mientras que a escala global la tendencia es de disminución y menor duración del manto de nieve, existe una gran variabilidad a escala local y regional sobre la evolución del manto de nieve. Esta variabilidad está con-

dicionada principalmente por diferencias climáticas, topográficas, geomorfológicas, de vegetación y otros procesos a pequeña escala (Brown y Mote, 2009; Viviroli *et al.*, 2011). En consecuencia, resulta necesario realizar estudios en detalle de áreas pequeñas para mejorar nuestra comprensión sobre cómo influyen estos factores en la dinámica nival.

Los Pirineos son una cordillera con una alta variabilidad climática que está sufriendo cambios notables en los últimos años:

- Disminución progresiva de los caudales máximos, mínimos y medios (Renard *et al.*, 2008)
- Recuperación de cubierta vegetal en zonas agrícolas abandonadas, habiéndose pasado de un 30 % a un 2 % de superficie cultivada (López-Moreno *et al.*, 2008)
- Desplazamiento de la *tree-line*, ecotono de transición entre el bosque y el pasto de altura, hacia altitudes mayores (Sangüesa-Barreda *et al.*, 2018)
- Transformación de zonas con nieve estable durante el invierno en zonas de nieve marginal, que presentan un elevado grado de heterogeneidad espacial y temporal en la distribución de la nieve (Bormann, 2013)

La transformación de los ambientes de media montaña debida al cambio climático va a condicionar la acumulación de nieve y, por tanto, el balance hídrico. Por ello resulta fundamental estudiar estos ambientes para entender cómo puede verse afectada la capacidad de reserva de los sistemas montañosos y poder plantear una adecuada política de gestión hidrológica en el futuro.

Objetivos

El objetivo de este trabajo es realizar la caracterización inicial de una zona de estudio con presencia de nieve marginal en el Pirineo Central aragonés mediante la recopilación de datos térmicos y la adquisición de imágenes con UAVs (Vehículos aéreos no tripulados, “drones”), estableciendo los límites de dichas técnicas. Se entiende por nieve marginal aquellas acumulaciones bajas, de menos de 1 m de espesor, con múltiples procesos de acumulación y fusión de nieve en la misma temporada.

Área de estudio

El área de estudio se halla en el Puerto del Cotefablo (UTM 30N 729144 4723019), en el Pirineo Central aragonés (**Figura 1**). Cuenta con una extensión de 3,4 ha y comprende un rango de altitudes de 1642 a 1696 m. La vegetación es un matorral de transición entre un pinar (*Pinus uncinata*) y un pastizal de altura, en el que predominan el boj (*Buxus sempervivens*), el enebro (*Juniperus communis*) y el erizón (*Echinopartum horridum*). Presenta una ladera de orientación este y otra de orientación oeste. Un aspecto importante, puesto que existen diferencias destacables entre ambas laderas: la ladera oeste recibe mayor radiación solar que la ladera este y la vegetación

es distinta. Mientras que el boj ocupa por igual ambas laderas, el enebro se sitúa únicamente en la ladera este y el erizón en la oeste. Para poder analizar de manera más detallada el efecto de estas diferencias entre ambas laderas se han definido dos zonas en las que centrar el estudio, una en cada ladera. El estudio se ha llevado a cabo desde el 18/11/2021 hasta el 24/02/2022.

2. Material y métodos

El estudio se ha realizado mediante dos técnicas: generación de mapas de espesor de nieve mediante fotogrametría de imágenes adquiridas con UAVs y análisis de datos térmicos en diversos puntos de ambas laderas (indicados en la **Figura 1**).

Mapas de nieve generados por fotogrametría

Para elaborar los mapas de nieve se han empleado tres UAVs: *SenseFly eBee-X*, *DJI Mavic Pro 2* y *DJI Matrice 300*. Las fechas de cada vuelo y el UAV que se empleó se indican en la **Tabla 1**. El número de vuelos y la fecha en que se realizaron estaban sujetos a dos criterios fundamentales: la caída de nieve en días recientes y las condiciones atmosféricas, fundamentalmente la ausencia de nubes y viento. No obstante, el último vuelo se realizó en mayo para garantizar que no quedara nieve en la zona y así poder usarlo como referencia.

La adquisición de imágenes la realiza la aeronave de manera autónoma ejecutando un plan de vuelo establecido en base a distintos parámetros. Una vez adquiridas, las imágenes se someten a un proceso de fotogrametría mediante el que se obtiene una nube de puntos que recrea la superficie tridimensional fotografiada. Esto se consigue gracias al solapamiento de las imágenes, ya que al localizarse un mismo punto en varias imágenes distintas resulta posible extraer información sobre el relieve. Al comparar la superficie de un día de nieve frente a la del día sin nieve se obtiene el espesor del manto por la diferencia de altitud entre ambas.

La metodología empleada se basó en otros trabajos realizados con UAVs en otra zona de estudio del Pirineo Central en los que se ha aplicado con éxito (Revuelto *et al.*, 2021a; 2021b). En el caso de este trabajo, los vuelos se llevaron a cabo con un grado de solapamiento del 85 % y una altitud de vuelo de entre 80 m y 120 m sobre el nivel del suelo.

Tabla 1. Relación de fechas de vuelo y UAV empleado.

Fecha del vuelo	14/12/2021	03/01/2022	19/01/2022	24/02/2022	11/05/2022
UAV empleado	<i>eBee-X</i>	<i>Mavic Pro 2</i>	<i>Matrice 300</i>	<i>Matrice 300</i>	<i>eBee-X</i>

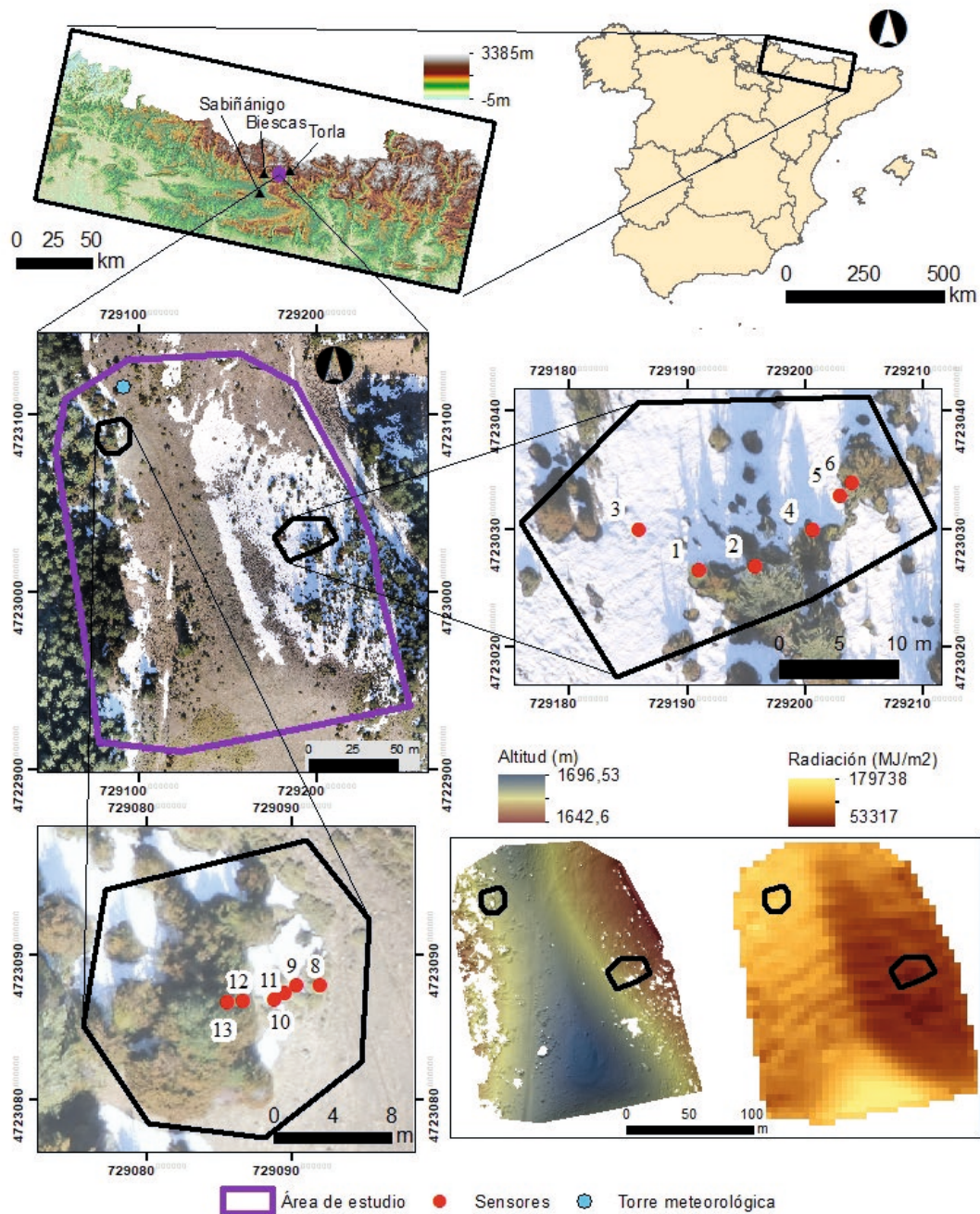


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Se muestra la localización de la torre meteorológica y la distribución de los sensores en las zonas seleccionadas de cada ladera. La foto base corresponde al aspecto del área de estudio el día 19/01/2022. Se incluyen además un mapa topográfico y un mapa de radiación para descripción más detallada (Elaboración propia).

Recopilación de datos de temperatura con sensores térmicos superficiales

Para la obtención de datos térmicos se instalaron doce equipos *Tomst TMS-4*, seis en cada ladera (en adelante, sensores). Estos sensores recogen la temperatura a 15 cm sobre la superficie del suelo, en la superficie del suelo y a 8 cm bajo el suelo (en adelante, superficie, suelo y subsuelo, respectivamente), además de medir la humedad del suelo (Wild *et al.*, 2019). La toma de datos se realizó durante el periodo de estudio (18/11/2021 – 24/02/2022) de manera continua cada 15 minutos hasta su retirada de la zona. En la **Tabla 2** se indica la posición de cada uno respecto a la vegetación. Además de los sensores, existe en la zona de estudio una torre meteorológica Hobo que, entre otras variables ambientales, mide la temperatura. Su ubicación y la de los sensores se muestra en la **Figura 1**.

Tabla 2. Relación de los sensores respecto a la vegetación

Sensor Tomst	Ladera	Vegetación	Posición respecto a vegetación
1	E	Enebro	Bajo la cubierta
2	E	Boj	Bajo la cubierta
3	E	-	En un claro
4	E	Enebro	Bajo el extremo de la cubierta
5	E	Enebro	Bajo el extremo de la cubierta
6	E	Enebro	Bajo el extremo de la cubierta
8	O	Erizón	Bajo la cubierta
9	O	-	En un claro entre erizones
10	O	Erizón	Bajo la cubierta, poco densa
11	O	-	En un claro entre erizones
12	O	Boj	Bajo el extremo de la cubierta
13	O	Boj	Bajo la cubierta

Con los datos de temperatura superficial y de la torre meteorológica se han calculado las dos variables de estudio: Oscilación térmica diaria (OTD) y temperatura media diaria (TMD). La OTD es la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima diarias. La OTD se ha utilizado para establecer dos criterios (proxys) de cara a la detección de nieve en la ubicación de cada sensor, de manera similar a otros trabajos (Danby y Hik, 2007) i) si $OTD < 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ existe acumulación de nieve abundante y ii) si $OTD < 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ existe cierta acumulación de nieve, pero sin formar un manto estable. La TMD también puede emplearse como criterio de detección de nieve: su estabilización en torno a los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante varios días es indicativo de la presencia de nieve, así como la inversión de las temperaturas. En ausencia de nieve, la temperatura más elevada es la de superficie y la más baja la medida bajo el suelo. Sin embargo, en los días fríos el manto de nieve actúa como aislante entre el aire frío y el suelo, por lo que la temperatura en superficie tiende a ser menor que la medida a mayor profundidad en el manto de nieve y se establece un gradiente térmico creciente desde el suelo hacia la superficie.

3. Resultados y discusión

Mapas de nieve

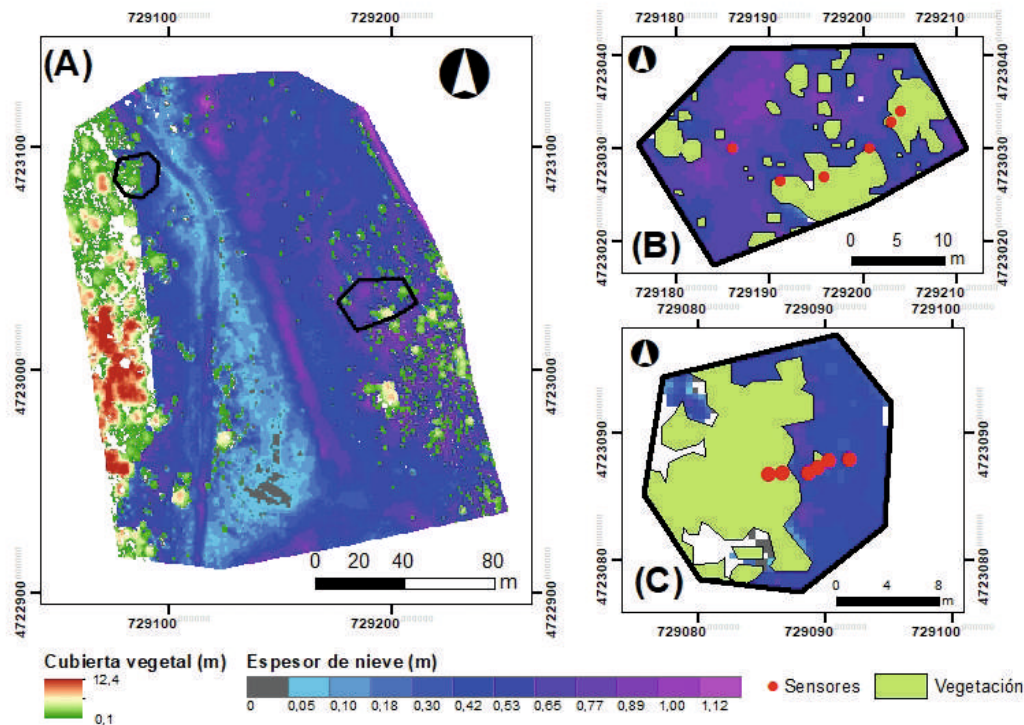


Figura 2. Mapa de nieve del 14/12/2021. (A) Área de estudio con capa de vegetación obtenida tras procesado de las imágenes. (B) Detalle de la ladera este. (C) Detalle de la ladera oeste. En (B) y (C) se señala la superficie ocupada por vegetación con el color verde.

En la **Figura 2** se presenta el mapa de nieve del 14/12/2021, el día con mayor acumulación de nieve. Se indica la presencia de vegetación para enmarcar mejor los resultados obtenidos. Se puede observar que en la ladera este se produce mayor acumulación de nieve que en la oeste. Esta diferencia es debida a la acción del viento predominante de componente oeste, lo que causa que en las laderas orientadas al oeste se produzca la erosión de la nieve, que se acumula a sotavento en las laderas este. Este efecto puede apreciarse claramente en el mapa: a la derecha del eje de la divisoria de aguas, en la ladera este, se encuentran los mayores espesores de nieve mientras que a la izquierda, en la ladera oeste, se encuentran los más bajos. Otro efecto que se puede observar en ambas laderas es la protección de la vegetación sobre el manto de nieve: en la ladera oeste el espesor es mayor a lo largo del límite del bosque y en la ladera este también es mayor en las zonas con vegetación.

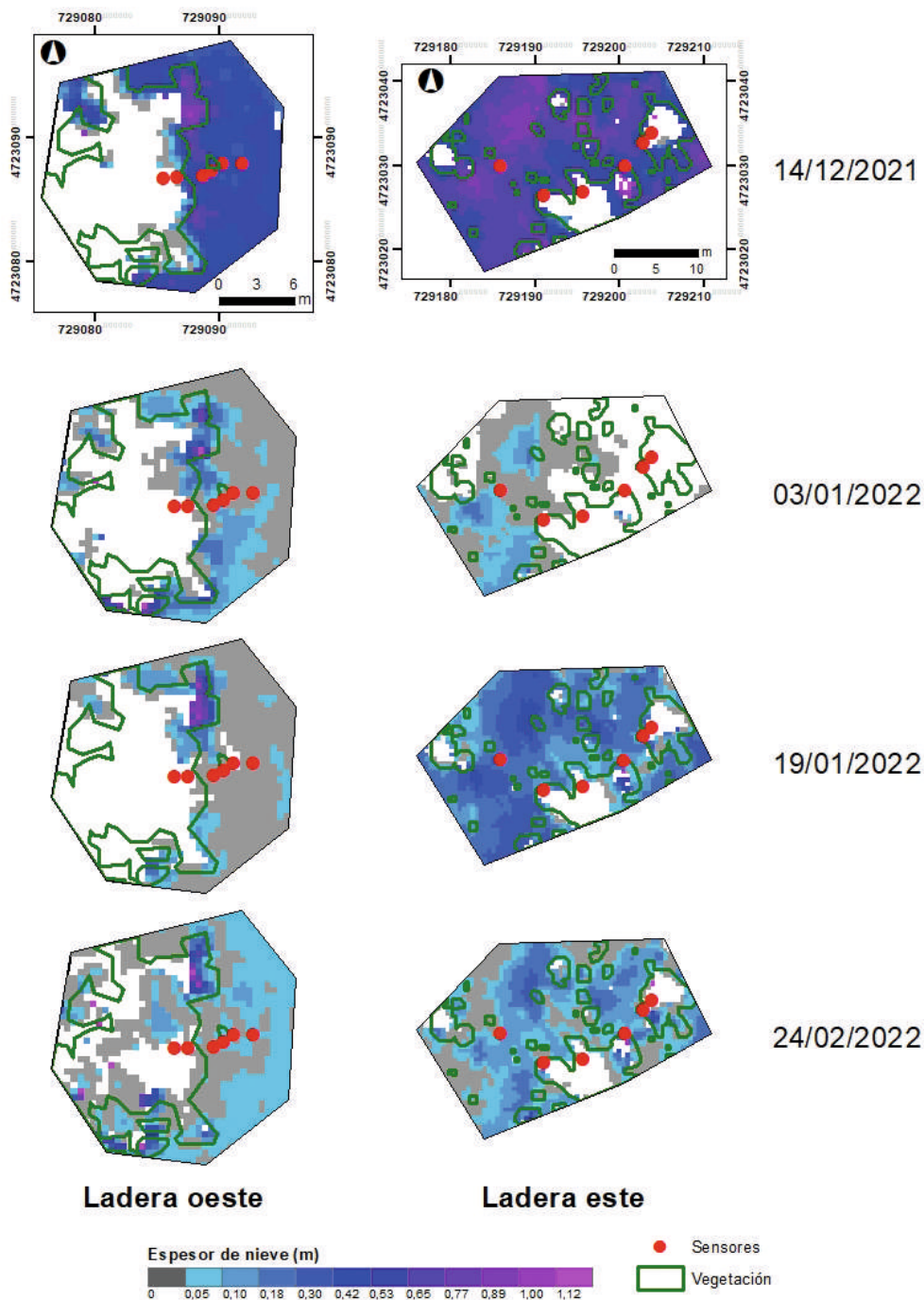


Figura 3. Comparación del manto de nieve entre ambas laderas en las fechas en las que se realizaron los vuelos.

A continuación se presenta la evolución del manto de nieve en las áreas seleccionadas de cada ladera (**Figura 3**). En la ladera oeste la nieve desaparece casi completamente en los meses de enero y febrero, mientras que en la ladera este la pérdida de espesor es más lenta y la nieve permanece

durante todo el periodo de observación, debido a la fuerte acumulación ligada a la acción del viento y a la menor radiación solar recibida (**Fig. 1**). En esta ladera queda patente el efecto de la vegetación mencionado anteriormente, ya que se observa un gradiente de espesor creciente desde el claro hacia la cubierta vegetal.

El mapa del 03/01/2022 presenta muchos píxeles en blanco, sin dato, fuera del contorno de la vegetación. Esto se puede observar principalmente en el extracto correspondiente a la ladera oeste y se extrapola al resto del mapa. Puede deberse fundamentalmente a un error técnico en el procesado de las imágenes tomadas por el *Mavic Pro 2*, ya que cuenta con un sistema de posicionamiento distinto al UAV que ejecutó el vuelo de referencia, por lo que se producen desajustes.

Otro aspecto destacable es que en la ladera oeste se observa un dato de espesor anómalo, unos 4 m al norte de los sensores. Este valor se mantiene constante por encima de 1 m en los cuatro mapas, lo que pone de manifiesto un defecto de esta técnica: hay vegetación que no ha sido correctamente eliminada de la capa del suelo durante el procesado de las nubes de puntos. Los filtros empleados en esta fase del proceso se establecen manualmente para cada caso mediante diversos parámetros y requieren de un largo proceso de prueba y error hasta que se consiguen los resultados deseados. Estas limitaciones ligadas al trabajo con fotogrametría son conocidas (Zhang *et al.*, 2016).

Datos térmicos

3.1.1. Ladera este

Para el análisis de la información de los sensores se han seleccionado, en base al proxy OTD < 2 °C en temperatura superficial, los sensores que mayor y menor acumulación de nieve presentan en cada ladera. Se ha analizado la evolución de sus TMDs para establecer fechas destacables que se han empleado en la interpretación conjunta de la variación de la OTD y la TMD superficial en los distintos sensores de la ladera.

En la **Figura 4** se presenta la evolución de la OTD y TMD superficial de los sensores de la ladera este. Se puede observar como a partir de la fecha *a* (23/11/2021) se reduce notablemente la OTD y la TMD de los sensores se estabiliza en torno a 0 °C o se encuentra por debajo. Esto indica el comienzo de la acumulación de nieve. Entre las fechas *b* y *c* (10/12/2021 – 19/12/2021), la estabilización de la TMD sucede en todos los sensores, indicando una acumulación considerable en todos ellos. Más adelante se suceden rápidamente una fuerte bajada de las temperaturas (*d*) y un episodio de precipitación (*e*), lo que en los sensores que aún mantenían cierta acumulación de nieve provoca un marcado descenso de la TMD, ya que la nieve impide que la radiación solar caliente el sensor y amortigua los aumentos de la temperatura ambiental. Durante la segunda mitad de enero y la primera de febrero el aumento de ambas variables indica la fusión progresiva del

manto hasta que finalmente, y tras otro marcado episodio de precipitación (f), toda la nieve se funde el 16/02/2022 (g).

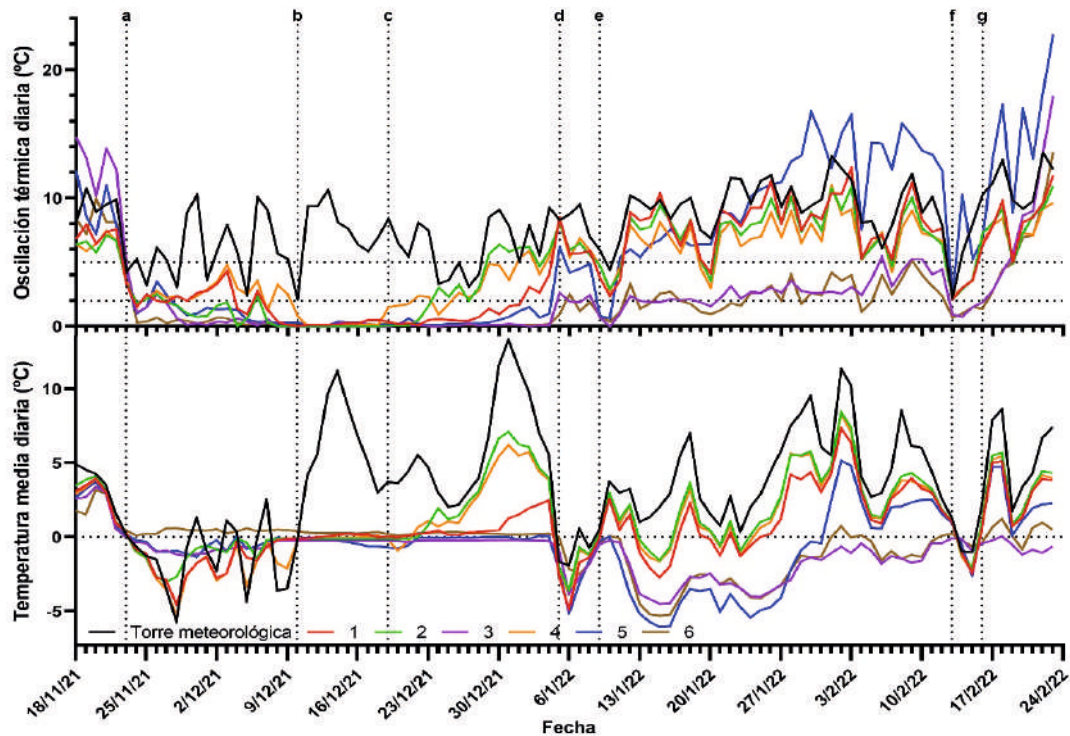


Figura 4. Evolución de las variables de estudio superficiales en los sensores de la ladera este. Las guías verticales con letras a-g indican fechas de interés: a) inicio de la acumulación de nieve, b) todos los sensores presentan acumulación, c) desaparece la nieve de los primeros sensores, d) marcado descenso de la TMD en el área de estudio, e) y f) episodios de precipitación, g) desaparición de la nieve en todos los sensores. Las guías horizontales en la gráfica superior se corresponden con los valores de OTD empleados para determinar la presencia de nieve en el entorno del sensor: 2 °C y 5 °C. Las líneas de colores corresponden a los sensores 1-6; la línea gris corresponde a la torre meteorológica.

3.1.2. Ladera oeste

Después de realizar el mismo análisis que en la ladera este, se presenta la evolución de la OTD y TMD superficial de los sensores de la ladera oeste en la **figura 5**. Con las letras a-g se indican los mismos eventos que los descritos en la otra ladera. No obstante, las fechas en las que estos se producen varían notablemente. Por ejemplo, en esta ladera la fusión del manto de nieve se produce con notable anterioridad, antes incluso del segundo periodo de precipitación. Por este motivo, la fecha f indica la desaparición del manto de nieve y la g el evento de precipitación, al revés que en la **Figura 4**. El resto de letras sí se corresponden con el mismo fenómeno en ambas laderas, pero difieren en la fecha.

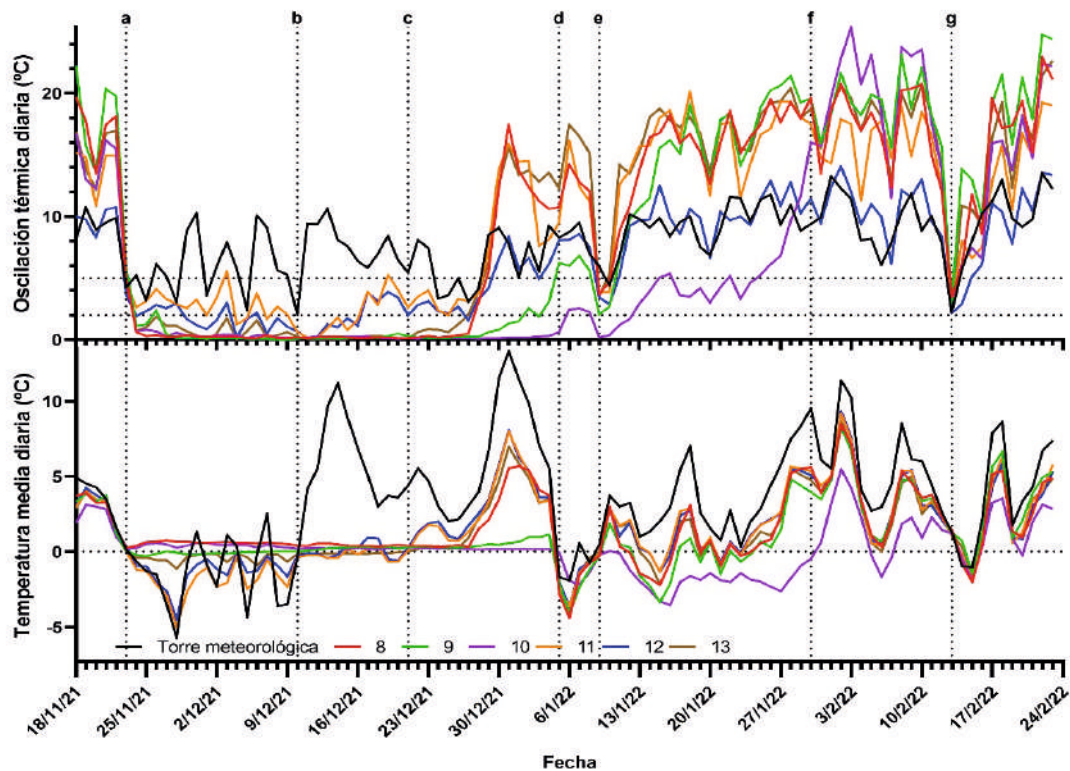


Figura 5. Evolución de las variables de estudio superficiales en los sensores de la ladera oeste. Las guías verticales con letras a-f indican fechas de interés: a-f) duración del manto de nieve en el sensor con mayor acumulación, b-c) duración del manto de nieve en el sensor con menor acumulación, e) y f) episodios de precipitación. Las guías horizontales en la gráfica superior se corresponden con los valores de OTD empleados para determinar la presencia de nieve en el entorno del sensor: 2 °C y 5 °C. Las líneas de colores corresponden a los sensores 8-13 ; la línea gris corresponde a la torre meteorológica.

3.1.3. Interpretación general de los resultados obtenidos con los sensores térmicos

En primer lugar, la información proporcionada por los sensores coincide con las conclusiones extraídas de la interpretación de los mapas de nieve: en la ladera este se acumula más nieve que en la ladera oeste.

El análisis de la información de los sensores plantea varias cuestiones. Por un lado, hay una gran diferencia entre la OTD de los sensores de la ladera este y los de la oeste a partir de la fecha *d*, a comienzos de enero, cuando se produce el fuerte descenso de la TMD de la torre. Esto se debe tanto a un incremento de la temperatura máxima diaria, condicionado por la radiación solar, como a una reducción de la temperatura mínima causada por mecanismos de enfriamiento de la superficie terrestre por radiación emitida por la noche. Este segundo fenómeno es común en ambas laderas. Sin embargo, dado que la ladera oeste recibe

más radiación, los sensores en ella se calientan más durante el día y esto provoca la diferencia entre las laderas.

Analizando la relación de los sensores con la vegetación circundante no se obtienen conclusiones claras, lo que puede indicar dos cosas distintas: i) la vegetación arbustiva no favorece la formación de un manto de nieve estable bajo su cubierta o ii) el efecto protector de la vegetación es parte de una respuesta más compleja en la que pueden influir otros factores que no hemos tenido en cuenta como las horas de sol que recibe el sensor, si se coloca a barlovento o sotavento de la vegetación, etc. Para poder aclarar esto sería necesario realizar un estudio con un mayor número de muestras y mayor control sobre los parámetros ambientales mencionados, de tal manera que los resultados obtenidos sean robustos.

Por último, los proxys empleados para la detección de nieve deberían ser revisados. En el estudio usado como referencia para plantear nuestros proxys se emplea un proxy de OTD $< 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Danby y Hik, 2007), pero hay que señalar que los mantos de nieve con los que se trabaja son de 50 cm. En nuestra zona de estudio el régimen de nieve presenta una fuerte variabilidad intra- e interanual y 50 cm es un espesor que no suele mantenerse durante un periodo de tiempo largo en muchos puntos. Por ese motivo se aumentó el margen de detección, con la intención de ser capaces de detectar los cambios continuos de suelo desnudo a suelo nevado y viceversa. En trabajos futuros podría plantearse la posibilidad de estudiarlo mediante la variación de la OTD y la TMD en la superficie del suelo respecto a las superficiales (por ejemplo: que se observe variación brusca en la OTD superficial mientras la del suelo permanece estable), ya que el proxy de OTD superficial $> 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ no parece ser capaz de responder a esta cuestión.

4. Conclusiones

Con este trabajo se ha logrado describir la variabilidad del manto de nieve de esta área de estudio tanto a nivel espacial como a nivel temporal. Mediante los mapas de nieve obtenidos por fotogrametría se ha podido conocer el estado general en cuanto a la presencia de nieve de toda el área de estudio, mientras los sensores han servido para hacer un diagnóstico continuo de la temperatura en los puntos concretos en los que se colocaron, pudiendo extrapolar algunas observaciones. Principalmente, se ha comprobado que la ladera este del área de estudio acumula más nieve que la ladera oeste y que la interacción entre la nieve y la vegetación parece depender de más factores de los que se han analizado en este estudio.

También se han observado algunos inconvenientes: en los mapas no se ha conseguido discernir entre vegetación y suelo desnudo en algunos puntos y con el empleo de proxys solo el de OTD superficial $< 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ha servido para identificar los periodos en los que la nieve cubre los sensores. Resulta necesario, por tanto, refinar los filtros de procesamiento de las nubes de puntos y proponer un nuevo proxy que sea capaz de distinguir entre suelo desnudo y bajas acumulaciones. Para ello es muy posible que sea necesario tener en cuenta la temperatura a ras de suelo y no solo sobre la superficie.

Agradecimientos

A mis tutores, Eduardo García Meléndez, del Área de Geodinámica Externa, Universidad de León y Jesús Revuelto Benedí, del Departamento de Hidrología Ambiental e Interacciones Clima y Actividad Humana, Instituto Pirenaico de Ecología – CSIC.

Referencias

- Barnett, T. P., Adam, J. C. y Lettenmaier, D. P. 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066):303-309.
- Brown, R. D. y Mote, P. W. 2009. The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing climate. *Journal of Climate*, 22(8):2124-2145.
- Danby, R. K. y Hik, D. S. 2007. Responses of white spruce (*Picea glauca*) to experimental warming at a subarctic alpine treeline. *Global Change Biology*, 13(2):437-451.
- López-Moreno, J. I., Beniston, M. y García-Ruiz, J. M. 2008. Environmental change and water management in the Pyrenees: Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Global and Planetary Change*, 61(3-4):300-312.
- Renard, B., Lang, M., Bois, P., Dupeyrat, A., Mestre, O. et al. 2008. Regional methods for trend detection: Assessing field significance and regional consistency. *Water Resources Research*, 44(8):1-17.
- Revuelto, J., Alonso-Gonzalez, E., Vidaller-Gayan, I., Lacroix, E., Izagirre, E., et al. 2021a. Intercomparison of UAV platforms for mapping snow depth distribution in complex alpine terrain, *Cold Regions Science and Technology*, 190:103344.
- Revuelto, J., López-Moreno, J. I. y Alonso-González, E. (2021b) Light and shadow in mapping alpine snowpack with unmanned aerial vehicles in the absence of ground control points. *Water Resources Research*, 57(6):1-22.
- Sangüesa-Barreda, G., Camarero, J. J., Esper, J., Galván, J. D. y Büntgen, U. 2018. A millennium-long perspective on high-elevation pine recruitment in the Spanish central pyrenees. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(9):1108-1113.
- Viviroli, D., Archer, D. R., Buytaert, W., Fowler, H. J., Greenwood, G. B. et al. 2011. Climate change and mountain water resources: Overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2):471-504.
- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M. y Weingartner, R. 2007. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance, *Water Resources Research*, 43(7):1-13.
- Wild, J., Kopecký, M., Macek, M., Šanda, M., Jankovec, J. y Haase, T. 2019. Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268:40-47.
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X. y Yan, G. 2016. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing*, 8(6):501.