

TRABAJO FIN DE MÁSTER

VARIABILIDAD ESPACIAL DEL ESPESOR DE NIEVE EN LA FRANJA SUPERIOR DEL BOSQUE SUBAL- PINO: OBSERVACIÓN CON VANT EN EL PIRINEO CENTRAL

Autor: FRANCISCO ROJAS HEREDIA

Directores: Jesús Revuelto Benedí y Fernando Pérez Cabello

Máster Universitario en

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del te-
rritorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

Noviembre de 2022



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

Estudiar la evolución espaciotemporal del manto de nieve en zonas de montaña es necesario para comprender el régimen estacional de ríos y torrentes, así como numerosos procesos físicos, ecológicos y socioeconómicos en zonas de montaña. Su dinámica está regulada en gran parte por la interacción que realiza con su entorno, fundamentalmente con el clima, las condiciones topográficas y las características de la vegetación con la que interactúa. El ecotono del Límite Superior del Bosque representa la transición entre el ambiente forestal subalpino al alpino, cubriendo grandes extensiones y marcadas elevaciones en el Pirineo con una fuerte presencia de nieve a lo largo del año. Este trabajo analiza y compara la distribución del espesor de nieve en las zonas más altas de los bosques de montaña del sector del Balneario de Panticosa (Pirineo Central Aragón), usando productos derivados de fotogrametría obtenidos mediante el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), en seis campañas de observación en el invierno y primavera de los años 2020 a 2022.

Los vuelos fotogramétricos fueron ejecutados con un VANT Ebee X de ala fija Sense Fly RTK y un cuadricóptero DJI Matrice 300 RTK con el que se cubrieron zonas de umbría y solana en dos laderas de orientación distinta (este y oeste) y en los que se contó con presencia de nieve continua entre los meses de diciembre y mayo. A partir de las imágenes georreferenciadas obtenidas con los diferentes vuelos, se derivaron insumos geoespaciales con el programa de fotogrametría Pix4D obteniendo como producto final nubes de puntos tridimensionales. De la comparación entre dichas nubes con presencia y ausencia de nieve se determinó la distribución espacial del espesor de nieve. A su vez, se generaron métricas de distribución espacial del bosque con distancias al límite del dosel y altura de la masa arbórea que, junto a variables topográficas como índices de exposición al viento, pendiente y radiación solar derivadas de las nubes de puntos con ausencia de nieve, se emplearon para evaluar la influencia de estas variables en la distribución del manto de nieve para los inviernos de 2021 y 2022.

Como resultados principales se ha demostrado el potencial de las tecnologías geoespaciales de alto detalle VANT, para monitorear procesos ambientales de la criósfera y biosfera en zonas de montaña de difícil acceso. La base de datos generada con estos sistemas de teledetección ha permitido identificar el efecto del dosel forestal en la acumulación de nieve en espacios abiertos del bosque a partir de métricas de la distribución espacial de los árboles evidenciando una mayor presencia de espesor de nieve en zonas abiertas. También se comprobó la importancia de las variables topográficas en la distribución espacio temporal del manto de nieve en la zona de estudio, en el que las laderas a sotavento y apantalladas por los árboles registraron mayores espesores.

Estos resultados destacan la alta variabilidad espacial del manto nival en zonas forestales. En este sentido, las métricas de la distribución del dosel forestal presentan una gran influencia, pero no pueden ser consideradas como la variable explicativa única para el entendimiento de la distribución espacial del manto de nieve en zonas abiertas en el bosque de montaña.

Palabras Clave: Manto de nieve, vehículo Aéreo no Tripulado (VANT), Límite superior del bosque, fotogrametría, Pirineos centrales.

Abstract

Studying the spatio-temporal evolution of snow cover in mountain areas is necessary to understand the seasonal regime of rivers and streams, as well as numerous physical, ecological and socio-economic processes in mountain areas. Its dynamic is largely regulated by its interaction with the environment, mainly with the climate, the topographical conditions, and the vegetation. The treeline forest represents the transition from subalpine to alpine forest environment, covering large areas and marked elevations in the Pyrenees with a strong presence of snow throughout the year. This master thesis analyses and compares the snow cover distribution in the highest mountain forest areas of the Balneario de Panticosa sector in the Central Pyrenees, using photogrammetry derived products obtained by using of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) during six field works in winter and spring of 2020 to 2022.

The photogrammetric flights were performed with an Ebee X fixed-wing UAV Sense Fly RTK and a DJI Matrice 300 RTK quadcopter covering sunny areas as well as in the shade areas on two slopes with different orientations (east and west) and continuous snow cover between December and May. Using the Pix4D photogrammetry software, geospatial inputs were derived from the georeferenced images obtained during the different flights, generating three-dimensional point clouds as a final product. Based on the comparison between point clouds with and without snow, the spatial distribution of snow cover was determined. At the same time, metrics of spatial distribution of the forest were generated with distances to the canopy edge and canopy height that together with topographic variables such as wind exposure index, slope and solar radiation that were obtained by geoprocessing the point clouds with absence of snow, their correlation and influence on the distribution of the snow cover during the winters of 2021 and 2022 was evaluated.

The main results demonstrate the potential of high-detail geospatial UAV technologies for monitoring environmental processes in the cryosphere and biosphere in mountain areas that are difficult to access by. The database generated with these remote sensing systems made it possible to identify the effect of the forest canopy on snow accumulation in open areas of the forest based on metrics of the spatial distribution of trees, showing a greater presence of snow thickness in open areas than nearby in the tree canopy. Moreover, the importance of topographic variables in the spatio-temporal distribution of snow cover was demonstrated, with leeward slopes and slopes screened by trees recording greater snow thicknesses throughout the study area.

The results highlight the important strong spatial variability of snow cover in forested areas, and while the metrics of forest canopy distribution cannot be considered the single explanation, they do present a strong influence on the spatial distribution of snow cover in open areas in the mountain forest.

Key Words: *Snowpack, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Canopy Forest, Photogrammetry, Central Pyrenees.*

Agradecimientos

Se hace especial mención a Jesús por la asesoría prestada. Sin su dedicación, paciencia y conocimiento este trabajo no hubiera sido posible.

Además, a Nacho por abrirme las puertas a un nuevo mundo y a Fernando por la siempre buena disposición y confianza.

Y a todos los que hicieron parte de esta montaña rusa de sensaciones. De nuevo, gracias.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. El papel de la distribución de la nieve en el medio ambiente.....	1
1.2. La interacción bosque-nieve en el contexto ambiental actual	2
1.3. La nieve en los Pirineos, relevancia de un bosque subalpino en expansión.....	3
1.4. Los drones como herramientas para monitorear la interacción nieve-bosque.....	4
2. OBJETIVOS E HIPOTESIS	7
2.1. Objetivos específicos	7
2.2. Hipótesis Específicas	7
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
3.1. Zona de Estudio.....	8
3.2. Observación con VANT y generación de nubes de puntos tridimensionales.....	10
3.2.1 Espesor de nieve (suelo vs dosel).....	14
3.2.2. Variables topográficas y variables descriptivas del dosel forestal	17
3.2.3. Validación de la información	19
3.2.4. Análisis geoestadísticos de las capas mediante <i>R studio</i>	20
4. RESULTADOS	20
4.1. Validación de las capas geoespaciales obtenidas en los geoprocesamientos	20
4.1.1. Evaluación de espesores de nieve derivados con VANT usando mediciones manuales	20
4.1.2. Evaluación de la máscara del bosque con el índice <i>NDVI</i>	21
4.2. Distribución espacial del manto de nieve: Evolución de los espesores medios en los flancos ...	22
4.2.1. Ladera Este (sector Fl.1.1).....	23
4.2.2. Ladera Este (sector Fl.1.2).....	26
4.2.3. Ladera oeste (Fl.2.2).....	28
4.3. Correlaciones entre variables topográficas y descriptivas del dosel forestal con el espesor de nieve	30
4.3.1 Categoría All	30
4.3.2 categoría Open.....	32
4.3.3 Categoría <i>Large gaps</i>	35
4.3.4 Categoría Small	37
4.3.5 Categoría Edge	37
5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	38
5.1. Aplicación de los VANT en el monitoreo del espesor de nieve en entornos forestales.....	38
5.2. Definición metodológica para la obtención de capas geoespaciales	38
5.3 La distribución espacio temporal del espesor de nieve y su relación con la masa arbórea	40
6. CONCLUSIONES.....	42
8. BIBLIOGRAFÍA.....	44
9. ANEXOS.....	55

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El papel de la distribución de la nieve en el medio ambiente

La nieve es un tipo de precipitación sólida constituida por pequeños cristales de hielo de estructura hexagonal y porosidad media que se agrupa y cae en copos de distintas formas de color generalmente blanco a translúcido y que se acumula sobre la superficie a manera de manto. Es un material de alta complejidad que permanece en el medio ambiente muy cerca de su temperatura de fusión con temperaturas inferiores o iguales a 0° C. Su estructura varía en función del tiempo tras su precipitación y posterior acumulación y las condiciones ambientales de la superficie, haciendo que una misma cuantía de nieve pueda variar su densidad de 100 kg/m³ a más de 500 Kg/m³ conforme a la presencia de aire entre sus moléculas, el nivel de sinterización y el contenido de agua líquida (Szabo y Schneebeli, 2007), siendo este un proceso natural originado por la presión que ejercen las distintas capas del manto así como por la interacción con la atmósfera y el terreno.

La presencia y persistencia del manto nival no es homogénea en todo el planeta, son las zonas de altas latitudes y altitudes ubicadas en el hemisferio norte donde se concentra la más grande extensión de superficie cubierta por nieve durante el año siguiendo el patrón estacional de acumulación-fusión en invierno-verano respectivamente (Robinson y Frei, 2010). Para el caso de las latitudes medias y bajas, las zonas de montaña ostentan las condiciones propicias para una distribución y acumulación extendida de nieve debido a su mayor altitud y correspondiente temperatura baja respecto a las zonas planas y bajas.

La evolución y permanencia del manto nival depende de la interacción energética que realiza con el entorno, siendo generalmente las variables meteorológicas temperatura y radiación solar las más determinantes (Flanner et al., 2011). No obstante, las características topográficas en donde se deposita y se contiene, la biota con la que interactúa y el nivel de aprovechamiento que efectúa el ser humano, condiciona en gran parte su distribución, acumulación y dinámica evolutiva teniendo un efecto determinante en un gran número de procesos físicos, ecológicos y ambientales (Thorn, 1978, Pomeroy, 1995).

Desde una perspectiva hídrica, el manto nival corresponde a un reservorio natural de agua dulce que regula caudales de ríos, lagos y represas mediante su paulatina fusión en épocas cálidas, principalmente primaverales y en las que muchas veces contribuye a la formación del pico máximo de caudal anual (Chai et al., 2022). Adicionalmente, la acumulación de nieve tiene una fuerte implicación en otros elementos de la criósfera como los glaciares, regulando el albedo de su superficie y determinando el Balance de Masa anual (Goelles y Bogglid, 2017).

El manto de nieve también influye en la evolución, fenología y desarrollo de plantas y microorganismos (Jones et al., 2001). A su vez, animales como los mamíferos regulan sus ciclos circadianos en función de la disponibilidad de hábitats en la temporada nival (Boelman et al., 2019).

Con relación a aspectos sociales y económicos, el manto de nieve aporta y regula agua fresca a los sistemas hídricos que abastecen alrededor de 2 billones de personas en el mundo y asegura aproximadamente el 30% de la irrigación total de los cultivos (Manking et al., 2015), dando un papel significativo a la nieve en el desarrollo económico de las poblaciones que se ven beneficiadas con su presencia y en las que desarrollan actividades económicas tales como instalaciones hidroeléctricas o el turismo de nieve (Adams et al., 2004). Cabe destacar la relevancia de la evolución espaciotemporal del manto de nieve de cara a gestionar riesgos naturales como avalanchas o inundaciones en zonas de piedemonte debido a fuertes procesos de fusión nival, siendo su gestión un elemento crítico en la planificación territorial y definición de zonas de uso de muchas de las regiones habitadas del planeta (Haberli y Whiteman, 2015).

1.2. La interacción bosque-nieve en el contexto ambiental actual

Las interacciones que controlan la evolución espaciotemporal del manto de nieve en las zonas forestales de montaña son complejas y cuantiosas. Cada individuo arbóreo puede interceptar nieve que precipita, quedando suspendida en las ramas, atenuando así el manto de nieve que acumula en el suelo y afectando notablemente su distribución en el entorno. Procesos como la sublimación, la fusión y la evaporación de la nieve son igualmente condicionados sobre la superficie por la presencia de árboles. Se estima que el dosel forestal puede interceptar en promedio el 50 % de nieve precipitada, variando en función de las condiciones atmosféricas y características de la masa arbórea (Pomeroy, 1993, Pomeroy y Gray, 1995, Essery y Pomeroy, 2004).

La intercepción de nieve que realiza el dosel arbóreo afecta la distribución en los niveles bajos del bosque y sotobosque, junto con el flujo energético de radiación de onda larga emitida por el tronco y las copas de los árboles, que condicionan notablemente la evolución de la nieve debajo del dosel (Sicart et al., 2004). Asimismo, generan un efecto de sombra de la radiación solar de onda corta en el terreno, afectando al intercambio de energía entre la superficie de la nieve y la atmósfera, originando diferencias en el balance energético entre zonas forestales relativamente abiertas (Mazzoti et al., 2019). Los árboles también condicionan el proceso de redistribución de nieve producida por el viento generando acumulaciones nivales en laderas a barlovento y que estén apantalladas por los árboles (Hiemstra et al., 2006), y en algunos bosques boreales pueden modificar hasta un 30% el impacto de la sublimación (Pomeroy y Essery, 1999).

Por otra parte, la distribución de los distintos ejemplares que componen una masa forestal no es continua y suele mostrar una gran heterogeneidad espacial, presentando zonas abiertas en donde se producen mayores acumulaciones de nieve (Donager et al., 2021). Si a este elemento se suma la gran variabilidad de respuestas que tienen los bosques según las condiciones climáticas y geográficas, puede llegar a explicarse en gran parte de la distribución del manto de nieve en entornos forestales de montaña

(Lundquist et al., 2013). La Figura 1, ejemplifica de manera esquemática cómo la presencia de los árboles afecta a los diferentes procesos que controlan la evolución del manto de nieve.

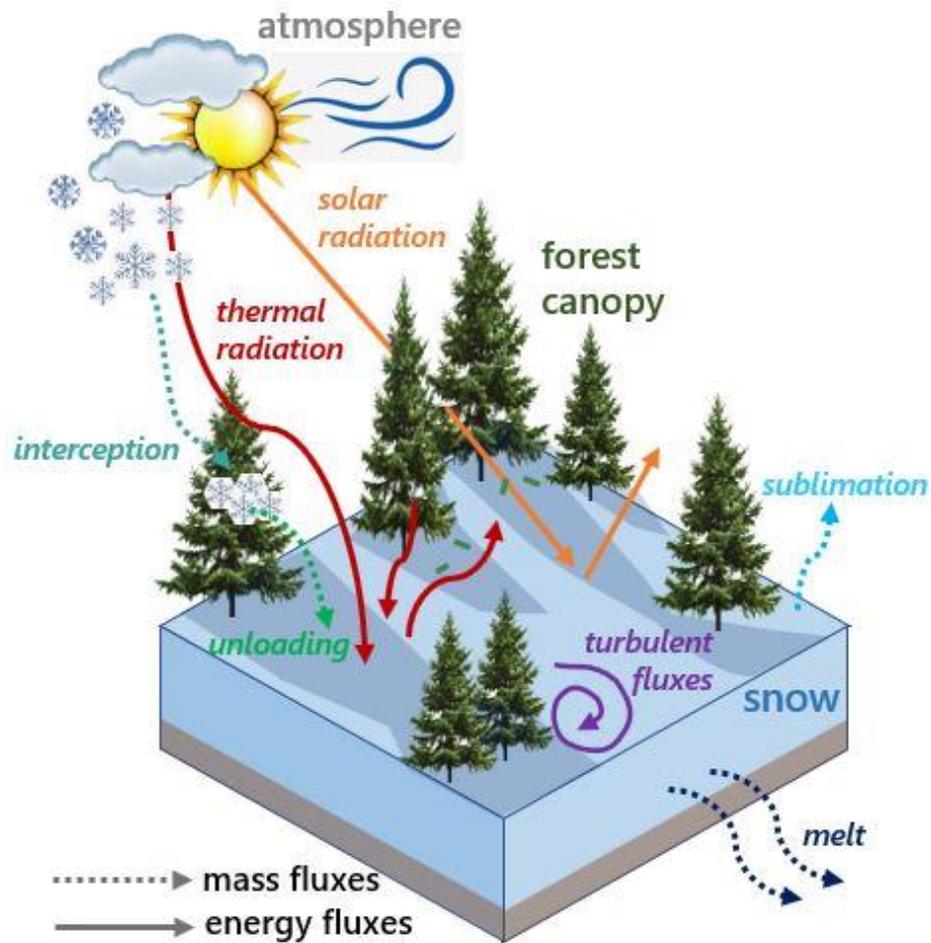


Figura 1. Esquema explicativo de los diferentes flujos de energía y masa que ocurren entre la vegetación boscosa y la nieve. Tomado de la página web del Instituto de investigación de Nieve y Avalanchas -SLF- de Suiza, 2022.

En el contexto actual de Cambio Ambiental, en el que se incluyen los efectos del Cambio Climático y Problemáticas Ambientales, se hace necesario mejorar la comprensión de los procesos que influyen en la distribución espaciotemporal del manto de nieve en zonas forestales, así como estudiar la implicación ambiental de la transición y ocupación paulatina de nuevos nichos antes desprovistos de vegetación frondosa (Thuiller et al., 2005).

1.3. La nieve en los Pirineos, relevancia de un bosque subalpino en expansión

Solo en el Pirineo, la fusión de nieve aporta alrededor del 40% del caudal total de drenajes en primavera (López-Moreno y García-Ruiz, 2009). Aunque en el Pirineo la acumulación de nieve este fuertemente marcada por la variabilidad interanual en donde el manto de nieve varía en función de la circulación atmosférica predominante (López-Moreno y Vicente-Serrano, 2007), se evidencia una especial sensibilidad al incremento de la temperatura con una disminución de días en los que precipita nieve

y una fusión total anual cada vez más temprana llegando a adelantarse en algunos años hasta un mes (Morán-Tejeda et al., 2017 y López-Moreno et al., 2020).

El sistema montañoso del Pirineo se extiende de este a oeste desde el mar Mediterráneo a la bahía de Vizcaya ocupando una extensión longitudinal aproximada de 450 km y un área de alrededor 55.000 km², con picos que sobrepasan los 3.000 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.) y presencia de pequeños glaciares refugiados en zonas de circos (García-Ruiz y Serrano, 2022). La mitad de la superficie del pirineo está cubierta por bosques de coníferas, extendidas en zonas de clima temperado influenciado fuertemente por el Mediterráneo (FAO, 2010). Estos bosques hacen parte de la macro categoría Bosques de Montaña, que se localizan entre 300 a 2500 msnm, ocupando alrededor de 9 millones de km² de la superficie de la tierra (Martin et al., 2011).

En el cinturón de bosque subalpino es donde ocurre la mayor interacción del manto nival estacional con la masa arbórea, cubriendo la franja que va desde los 1600 hasta los 2300-2500 (m s.n.m), estando cubierta más del 50% de la superficie por nieve entre los meses de diciembre a abril (Gascoin et al., 2015). Está compuesto por flora Bóreo-Alpina dominado por bosques de *Pinus Uncinata* o Pino Negro, en el que los individuos maduros pueden crecer hasta los 18-20 m y tener un diámetro de tronco hasta de 1 metro. Su época de floración empieza a finales de mayo, con un crecimiento mayor de anillos hasta julio, terminando en octubre con la maduración de sus piñas (Ninot et al., 2007). A medida que las condiciones ambientales limitan su crecimiento por las bajas temperaturas, la falta de nutrientes en el suelo, entre otras, la presencia de pinos se reduce abriendo paso a arbustos, maleza y pastos, constituyendo el Límite Superior del Bosque o *Treeline* en inglés, como un ecotono hacia el ambiente alpino que corresponde al punto más alto donde se extiende la masa arbórea (Korner, 1998).

Los bosques del Pirineo no son ajenos a los cambios producidos por el Cambio Ambiental global. La masa forestal está incrementando y registra una progresiva ampliación altitudinal debido a la disminución de la presión humana y aumento de temperaturas (Camarero et al., 2018). Las implicaciones en la distribución espaciotemporal del manto de nieve en la superficie por estos procesos, refuerza la necesidad de generar trabajos que exploren la interacción del manto nival con el bosque, haciendo uso de las técnicas que mejoren la resolución espacial de análisis y faciliten la obtención de información en zonas de gran extensión y con alta heterogeneidad topográfica como la franja de bosque subalpina. Es por esto que en el marco de este Trabajo Final de Master se estudia la variabilidad espaciotemporal del espesor de nieve en el entorno del balneario de Panticosa, en el que se presenta una marcada innovación en invierno y primavera (Sanmiguel- Vallelado et al., 2022) y hay una copiosa masa forestal subalpina.

1.4. Los drones como herramientas para monitorear la interacción nieve-bosque

Estudiar el manto de nieve conlleva la implementación de diversos métodos de seguimiento y medición de técnicas directas e indirectas. La ejecución de pozos y sondeos de nieve de manera periódica

y sistemática, junto con la instalación de sensores o estaciones meteorológicas con termómetros, pluviómetros, balizas, sensores de altura de nieve y radiómetros, permiten conocer la evolución temporal de variables como la profundidad y densidad de la nieve, el *Snow Water Equivalent* (SWE), o la evolución de variables atmosféricas en la superficie observada (Hedstrom y Pomeroy, 1998, López et al., 2013, Musselman et al., 2021). Además de estos sensores, las observaciones pueden complementarse con otros equipos más específicos para las zonas boscosas, tales como dendrómetros, cámaras time-lapse y mediciones directas a la masa arbórea para derivar tasas de crecimiento de los árboles, así como su altura y área basal (López-Moreno y Latron, 2007, Revuelto et al., 2016, Sanmiguel-Valladolid et al., 2020).

A su vez, el uso de sensores remotos activos y pasivos acoplados a diferentes plataformas móviles como aviones o satélites es cada vez más frecuente, dada su gran versatilidad para observar zonas muy extensas, su visión sintética de una amplia gama de variables de seguimiento y la rapidez de adquisición de información reduciendo costes al aumentar las superficies de rastreo (Chuvieco, 2002).

El uso de productos satelitales para observar las zonas cubiertas por nieve puede realizarse con múltiples plataformas, pasando por datos de satélites como Sentinel-1 del programa espacial europeo ESA, en el que se estudian extensas áreas como las montañas del hemisferio norte en la Sierra Nevada Estadounidense y los Alpes Europeos con ventanas de resolución de 1km^2 (Lievens et al., 2019), hasta programas masivos de seguimiento como el *SnowEx* implementado anualmente por el *National Aeronautics and Space Administration* NASA, que pretende conocer el contenido de agua almacenado en regiones cubiertas por nieve enfocándose en el cálculo del SWE y el balance de energía de nieve en zona boscosa (Kim et al., 2017).

En los Pirineos, se han realizado observaciones sistemáticas de la cobertura de nieve basados en observaciones satelitales que buscan comprender la variabilidad interanual de la duración del manto de nieve en la cordillera (Gascoin et al., 2014, Alonso-González et al., 2019). Sin embargo, los satélites pasivos poseen limitaciones en su resolución espacial para determinar con exactitud las interacciones entre la vegetación y la nieve a escalas detalladas (Nolin, 2017).

El sistema activo *Light Detection and Ranging* (LiDAR), tiene una aplicación extendida en el seguimiento espaciotemporal de la interacción del manto de nieve y el bosque a escala espaciales de alta resolución, ya sea acoplada a aviones, helicópteros o vehículos Aéreos No Tripulados UAV por sus siglas en inglés (*Unmanned Aerial Vehicles*), o en plataformas terrestres como mástiles y trípodes en cuencas de estudio con áreas pequeñas (James et al., 2017). Esta técnica permite observar ciertos procesos que no pueden ser abordables con observaciones satelitales o manuales, llegando a mejorar hasta un 28% más de la variación de la acumulación y ablación de la nieve respecto a métricas tradicionales (Varhola, 2013), llegando a ser aplicado para la monitorización del manto de nieve en zonas forestales y subalpinas del Pirineo (Revuelto et al., 2015). A pesar de sus extendidos beneficios, el costo e implementación es bastante elevado respecto a otras tecnologías y en el caso de las plataformas móviles

terrestres, la heterogeneidad del terreno puede hacer que su montaje se vea comprometido (Harder et al. 2020).

La aplicación fotogramétrica con el uso de cámaras RGB y multiespectrales embarcadas en VANT para la observación de dinámicas ambientales ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años (Lendzoich et al. 2019, Eker, 2019), debido principalmente a su portabilidad, versatilidad de trabajo en sitios remotos y relativo bajo costo. Esta técnica permite la reconstrucción tridimensional al aplicar técnicas de fotogrametría en movimiento o *Structure from motion* (SfM) (Figura 2), que aprovechan el solape de áreas comunes entre las imágenes adquiridas de una determinada zona de estudio (Westoby et al. 2012). De dichas reconstrucciones tridimensionales es posible derivar variables como la distribución del manto de nieve a partir de la comparación entre superficies generadas en periodos diferentes con y sin nieve.

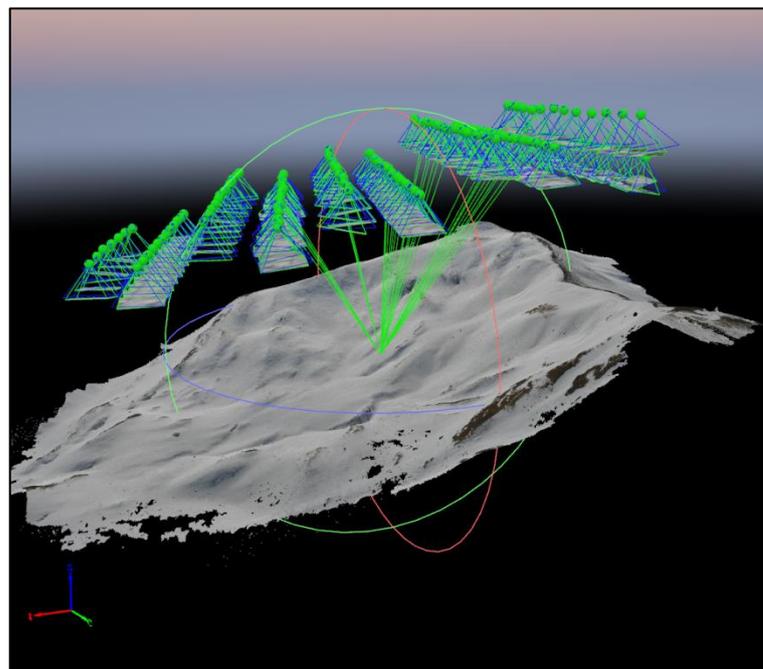


Figura 2. Esquema básico del proceso fotogramétrico de una superficie innivada mediante el uso de fotografías obtenidas con VANTs. Suministrada por Jesús Revuelto, 2022.

La aplicación de distintas plataformas VANTs como cuadricópteros y drones de ala fija han sido aplicados y evaluados en los Pirineos en los últimos años para observar la distribución espaciotemporal del manto de nieve. La primera de estas evaluaciones fue realizada en la Cuenca Experimental de Izas en donde se analizó el impacto que tienen distintas condiciones ambientales como la iluminación, características de la superficie de nieve o la presencia de nubosidad, en la obtención de espesores de nieve, concluyendo que bajo buenas condiciones de iluminación el error cuadrático medio es inferior a 0.19m (Revuelto et al., 2021).

Sin embargo, la implementación y uso de VANT en el seguimiento de la evolución espacio temporal de la distribución de la nieve en la franja superior del bosque no es una técnica extendida debido a su

reciente implementación en la monitorización de la nieve. Se presenta como un nicho de conocimiento todavía poco explorado haciendo novedosa su implementación en zonas de montaña forestales y de difícil acceso. En este trabajo se ha empleado dos plataformas VANT para observar la variabilidad espaciotemporal del manto de nieve en zonas forestales subalpinas en un sector del Pirineo central, siendo la primera aplicación sistemática en un ambiente forestal en el Pirineo usando estas técnicas de teledetección.

2. OBJETIVOS E HIPOTESIS

Este trabajo busca explorar la pertinencia del uso de VANTs para cartografiar la distribución espaciotemporal del manto de nieve y analizar el impacto que las características topográficas y las variables descriptivas de las masas forestales tienen en la acumulación y fusión del manto de nieve. Para ello se establece el siguiente objetivo general en este Trabajo Final de Máster: Estudiar la dinámica de acumulación y fusión del manto de nieve en la franja superior del bosque subalpino en el pirineo central, mediante productos derivados de fotogrametría -SfM- obtenidos con VANTs durante el periodo invernal del 2021-2022. A continuación, se detallan los objetivos específicos:

2.1. Objetivos específicos

1. Definir un protocolo para cartografiar la distribución espacial del espesor de nieve en zonas forestales de montaña basado en insumos geoespaciales de observaciones con VANT y productos derivados de fotogrametría -SfM-.
2. Generar variables topográficas y descriptivas de la distribución espacial de la masa arbórea que permitan caracterizar la heterogeneidad de la franja superior del bosque subalpino.
3. Analizar la relevancia de las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal en la distribución espacial del manto de nieve en espacios abiertos (*Forest Gaps*) y zonas aleñadas al dosel arbóreo (*Canopy Edge*) en la franja superior del bosque subalpino.

Este trabajo se fundamenta bajo la primicia de la siguiente hipótesis general: La acumulación y distribución espaciotemporal de nieve en la franja superior del bosque subalpino, está condicionada en gran parte por la presencia y distribución espacial de masas arbóreas. A continuación, se detallan las hipótesis específicas:

2.2. Hipótesis Específicas

1. Los productos geoespaciales derivados de las observaciones con VANT, permiten una clasificación de coberturas del terreno, siendo posible diferenciar el suelo y el dosel arbóreo. Esto permite

generar análisis geoespaciales como el cálculo del manto nival y métricas del manto forestal de manera fiable.

2. El dosel arbóreo juega un papel relevante en la dinámica de la distribución de la nieve teniendo mayor predominancia que variables topográficas como la altitud y la pendiente en zonas de estudio detalladas con relativo terreno estable.
3. Se asume que entre mayor sea la distancia al límite del dosel arbóreo, mayor será la acumulación de nieve respecto a las mismas. La distancia para determinar las mayores acumulaciones depende de las características medias de la altura de los árboles del entorno.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Zona de Estudio

El Balneario de Panticosa se ubica en los Pirineos Oscenses, en la margen izquierda de la cabecera del Río Gállego, en el valle de Tena. Dicho balneario es una antigua cubeta de sobre excavación glaciaria con fuertes pendientes y picos que alcanzan los 3000 m s.n.m, en la margen occidental y 2700 m s.n.m en la oriental, encontrándose la zona más baja a 1640 m s.n.m. El Balneario de Panticosa es la cabecera del río Caldares, tributario del río Gállego. Parte de los eventos meteorológicos que afectan a esta zona tienen influencia de advecciones provenientes del mar Mediterráneo, aunque los frentes provenientes del Atlántico tienen también relativa relevancia en la climatología local. La precipitación se concentra principalmente en la temporada de invierno entre los meses de noviembre a marzo, con una isoterma que se mantiene alrededor de los 0° a los 1600 m s.n.m. entre noviembre y abril (De la Riva, 2000), haciendo que gran parte de esta se produzca en forma de nieve.

La zona está dominada principalmente por bosques de *Pinus Uncinata* cubriendo franjas que van desde los 1600 a los 2300 m s.n.m. Las zonas bajas del Balneario de Panticosa cuentan con una fuerte presencia de Bosques que van disminuyendo en su densidad al progresar en altitud, dando paso a especies con menor porte con un mosaico de matorrales, pastos y vegetación tipo *krummholz* (Camarero et al., 2000). Este sector ha tenido una progresiva repoblación natural que inicio en la década de los treinta del siglo pasado que ha permitido repoblar la masa arbórea sin presentar intervenciones de gran índole (Camarero y Gutiérrez, 1998).

La zona de estudio fue seleccionada por su fácil aproximación y cercanía a zonas pobladas, alta variabilidad espacial entre zonas de umbría y de solana, así como los repetidos episodios de acumulación de nieve. Todo ello ha permitido monitorear dos laderas con 3 zonas de seguimiento (2 en el flanco oeste y 1 en el flanco este), con diferentes orientaciones y porcentaje de masa arbórea (Tabla 1 y Figura 3),

en donde se aplicó una metodología de procesamiento geoespacial generalizada para las observaciones y su posterior análisis.

Tabla 1. Descripción de las principales características topográficas de los flancos de estudio.

Zona	Área (ha)	Altitud Max. (m)	Altura Min. (m)	Orientación	Área forestal total (%)	Altura media del dosel forestal (m)
Ladera este FI 1.1	16,8	2072	1832	Sureste	14,42	9,64
Ladera este FI 1.2	23,2	1916	2192	Sureste	4,13	6,87
Ladera oeste FI 2.2	31	1992	Suroeste	7,44	7,98	

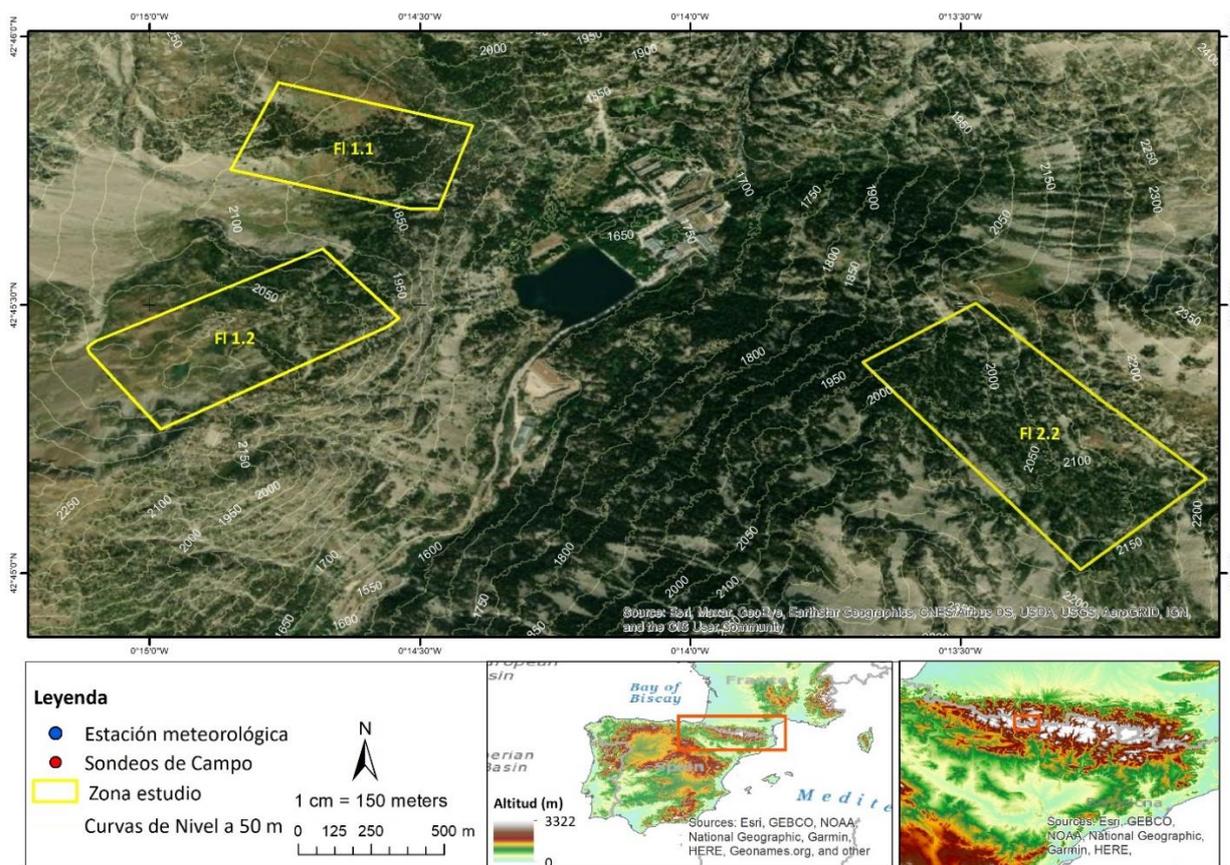


Figura 3. Mapa de las zonas de análisis en los flancos de estudio establecidos en el Balneario de Panticosa.

A su vez, se consultaron los datos registrados por la estación meteorológica de Baños de Panticosa ubicada a 1640 m s.n.m en inmediación del refugio Casa de Piedra. Debido a inconsistencias en la serie temporal de las variables medidas como manto de nieve o precipitación, solo pudieron ser analizados los datos de temperatura promedio, máxima y mínima. Estos corresponden a registros quince-minutales que fueron convertidos a datos diarios, con la correspondiente extracción previa de valores anómalos, y fueron representados en los periodos comprendidos entre el 1 de septiembre de 2021 y el 30 de junio de 2021 y el 1 de septiembre de 2021 al 30 de junio de 2022, permitiendo analizar visualmente las tendencias previas a los vuelos programados (Figura 4).

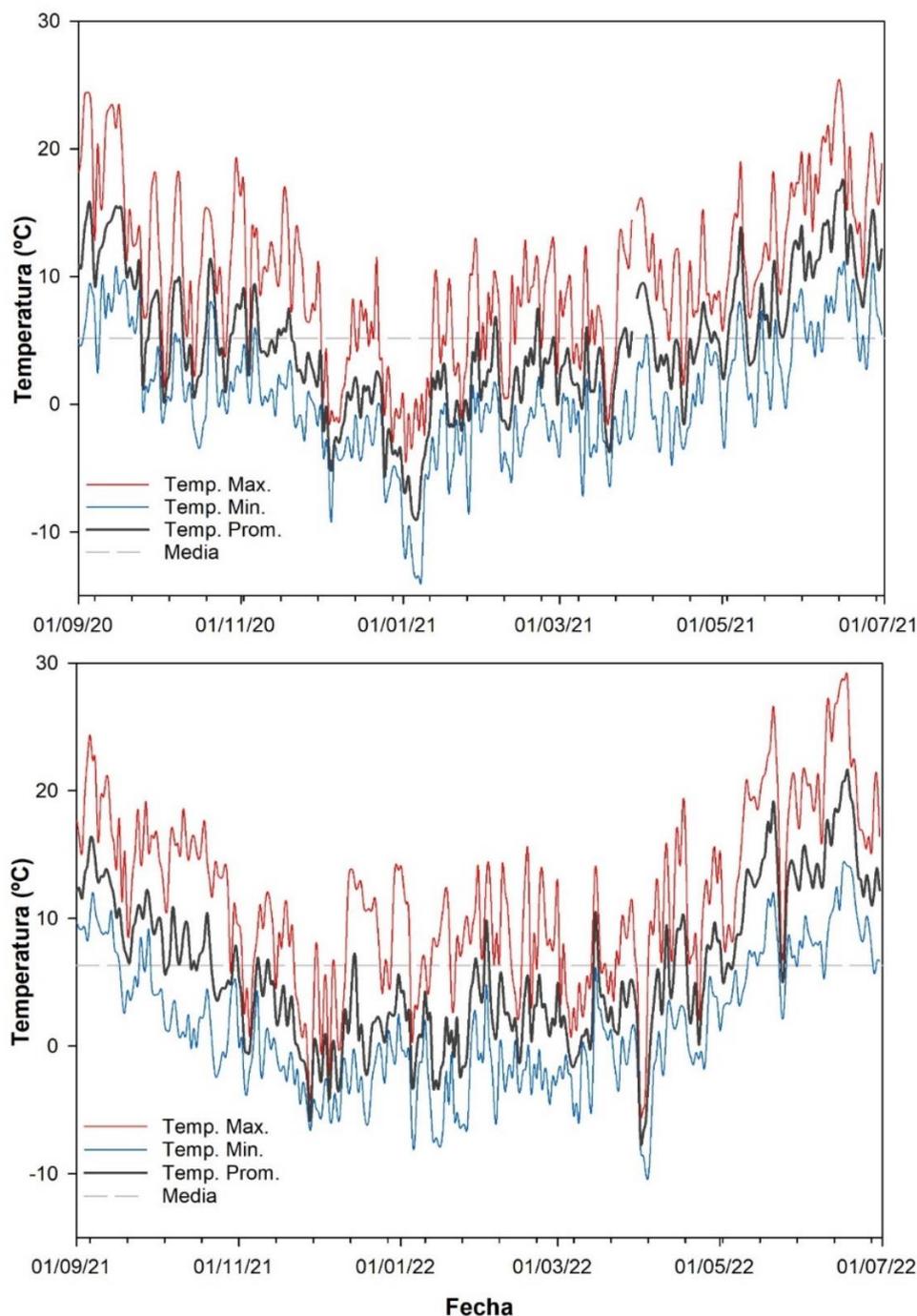


Figura 4. Temperatura promedio, máxima y mínima diaria registrada por la estación Casa de Piedra en el Balneario de Panticosa. El promedio ha sido calculado para el periodo comprendido entre el 1 de septiembre de 2020 al 30 de junio del 2021 y el 1 de septiembre de 2021 al 30 de junio de 2022.

3.2. Observación con VANT y generación de nubes de puntos tridimensionales

En el marco de este trabajo, se realizaron seis visitas a la zona de estudio en el periodo comprendido entre el 19 de noviembre de 2020 y el 5 de mayo de 2022, obteniéndose un total de 22 vuelos que cubrieron las zonas de las laderas en los diferentes días muestreados. Las fechas de los vuelos fueron establecidas a partir de los datos recogidos en tiempo real en el Refugio Casa de Piedra, situado en el balneario de Panticosa. Este refugio cuenta con una cámara web y una torre meteorológica que permite

observar la evolución de distintas variables meteorológicas en tiempo real. Se realizó un chequeo rutinario de estos sistemas automáticos para observar eventos relevantes de acumulación y fusión de nieve, además de consultas periódicas de las previsiones meteorológicas, acudiendo a la zona de estudio en las siguientes fechas: 19 de noviembre de 2020, 19 de enero 2021, 16 de febrero de 2021, 10 de marzo de 2021, 8 de junio de 2021 y 4 y 5 de mayo de 2022. Se realizaron también vuelos con los VANTs en dos días sin presencia de nieve para así caracterizar posteriormente el suelo y la masa forestal (vuelos del 19 de noviembre de 2020 y 8 de junio de 2021).

El recorrido total realizado por el VANT en cada uno de los vuelos fue optimizado con el fin de cubrir la mayor área posible, en el que algunas veces se sobrevolaron varias zonas de estudio en el mismo proyecto (Tabla 2). Estos vuelos fueron programados de esta manera con el fin de aprovechar las condiciones atmosféricas favorables y el tiempo en el aire de la aeronave, que en el caso del ala fija *Ebee X*, posteriormente descrito, es de especial vigilancia debido a que su forma de aterrizaje puede exponer al equipo a daños por choque con elementos en la superficie.

Durante las sesiones de levantamiento fotogramétrico, se evaluaron constantemente las condiciones meteorológicas referentes a la dirección y velocidad del viento, ángulo de incidencia y cambios de la iluminación solar, además de presencia de nubosidad y humedad alta, todo esto con el fin de asegurar la estabilidad e integridad de los VANTs y los productos geoespaciales derivados (Revuelto et al., 2021). Los VANTs que se emplearon en este trabajo son descritos a continuación: un *Sense Fly* de ala fija *Ebee X* y un dron multirotor *DJI Matrice 300 RTK* (Figura 5). El primero de estos dispositivos, cuenta con una autonomía de vuelo de 59 minutos y estaba equipado con una cámara fotográfica RGB de 20 Megapíxeles (3648x5472) con un sensor *CMOS* de 1 pulgada (cámara S.O.D.A. 3D). La óptica por defecto es una lente de 29 mm con rango de apertura de diafragma de $f/2.8$ a $f/11$. Para los vuelos del dron de ala fija, la programación y planificación de vuelo se realizó mediante el programa *Emotion 3*. El *Ebee X* fue empleado en las primeras cinco campañas de campo. En la última campaña realizada el 4 y 5 de mayo del 2022, se usó el multirotor *DJI Matrice 300 RTK*, debido a problemas técnicos del *hardware* del dron de ala fija que impidieron emplearlo. El *DJI matrice 300 RTK* tiene una autonomía teórica de 55 minutos, y estaba equipado con una cámara *Zenmuse P1* con sensor *Full Frame* de 45 megapíxeles de resolución (8192x5460), y un objetivo de 35 mm con apertura de diafragma de $f.2.8$ a $f/16$. En esta última campaña, también se realizaron vuelos con una cámara multiespectral *Micasense Altum* que registra información en 5 bandas espectrales diferentes (centro de banda: Azul – 475 nm, Verde – 560 nm, Rojo – 668 nm, rojo próximo – 717 nm, Infrarrojo cercano – 842 nm y térmico – 11 μm). Esta cámara posee un sensor de $\frac{1}{4}$ de formato con una resolución de 3,2 megapíxeles para el rango del óptico y una lente de 8 mm de distancia focal.



Figura 5. Fotografías del UAV *multirotor DJI Matrice 300 RTK* (izquierda) y el *Sense Fly* de ala fija *Ebee X RTK* (derecha) en el marco de las campañas de campo.

El posicionamiento de las imágenes adquiridas en los vuelos contó con una exactitud en las posiciones X y Y inferiores a 2 cm y por debajo de los 5 cm en Z. Esto fue posible gracias a que ambos dispositivos empleados cuentan con posicionamiento GPS (*Global Positioning System*), corregido en tiempo real RTK (*Real Time Kinematic*), gracias a una conexión virtual vía internet a la red geodésica local de Aragón ARAGEA, mediante *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol* (NTRIP). Este posicionamiento establece una estación de referencia virtual en el punto en que el operador está controlando el VANT, trabajando así de manera equivalente a un receptor GNSS. No obstante, la naturaleza heterogénea del terreno hizo que en algunos momentos se perdiera la conexión a la red, por lo que no era posible realizar la corrección de posicionamiento RTK. En estos casos, el programa de control *Emotion 3.0* permitió realizar un posicionamiento exacto de las imágenes basado en un levantamiento *PPK* (*Post-Processed Kinematic*), mediante la utilización de datos de geolocalización crudos provenientes de archivos *Rinex* (*Receiver INdependent EXchange format*) de las estaciones activas del programa ARAGEA que son descargados y procesados en oficina.

Los vuelos fueron programados teniendo las mismas características de solape y altura de vuelo en las 2 laderas para todos los días de muestreo. De este modo se establecieron elevados solapes entre las imágenes para garantizar una mayor eficiencia en la reconstrucción *SfM* en un entorno heterogéneo como lo son los bosques en zonas de montaña. El solape longitudinal entre imágenes fue de un 40% y el transversal del 80%. El bajo solape lateral fue programado de esta manera debido a que las cámaras digitales usadas cuentan con un sistema *Gimbal* que permite obtener imágenes con un cierto ángulo de inclinación. Para este estudio, la inclinación de la cámara fue de 0° y 30°, admitiendo reducir el solape y capturando información de las zonas laterales e inferiores de la copa de los árboles, permitiendo que los algoritmos *SfM* generarán puntos debajo del dosel forestal. La altura de vuelo fue establecida para

que la resolución espacial de los productos, conocida como *Ground Sampling Distance* GSD, fuese elevada, siendo en promedio de 5.3 cm/píxel (Tabla 2). En total para cada día de vuelo y en cada una de las zonas de las laderas se obtuvieron entre 200 y 500 imágenes. Los parámetros de toma de fotografía se definieron de manera automática aprovechando los valores recomendados por los exposímetros internos de las cámaras, tan solo verificando que las velocidades de obturación estuvieran a más de 1/125 de segundo y el diafragma preferiblemente cerrado o inferior a f.10, asegurando la profundidad de campo y el no barrido de los elementos en las fotografías.

Tabla 2. Dato de toma y VANT utilizado en cada una de las campañas de campo realizadas. Se reporta el GSD final de cada uno de los proyectos tras ser obtenida la nube de puntos en el programa de fotogrametría. Las filas resaltadas en color gris corresponden a los vuelos de referencia con el suelo desprovisto de nieve.

Dron	Fecha	Flanco 1.1	Flanco 1.2	Flanco 2.2
Sense Fly Ebee X	19/11/2020	A. 0016 GSD. 9,82 cm/px		
	19/01/2021	B. 0017 GSD. 7,43 cm/px		C. 0018 GSD. 5,78 cm/px
	16/02/2021		D. 0182 GSD. 6,84 cm/px Hora de inicio: 10:30	
		F. 0183 GSD. 7,8 cm/px Hora de inicio: 12:00		G. 0183 GSD. 5,82 cm/px Hora de inicio: 12:00
			H. 0184 GSD. 6,49 cm/px Hora de inicio:14:00	
	10/03/2021	J. 0030 GSD. 6,34 cm/px		K.0032 GSD. 5,85 cm/px
	08/06/2021	L. 0061 GSD. 6,5 cm/px		M. 0060 GSD. 5,82 cm/px
DJI Matrice 300	04/05/2022	O. 009 GSD. 2,89 cm/px	N. 007_008 GSD. 2,47 cm/px	
	05/05/2022			P. 011 GSD. 2,75 cm/px

El procesamiento fotogramétrico SfM se realizó con el programa *PIX4D mapper* (versión 4.4.12). Este programa permite generar nubes de puntos tridimensionales que reproducen las superficies observadas a partir de las imágenes adquiridas en los diferentes vuelos programados. El método sigue una secuencia estructurada de pasos, que inicia con la calibración de los parámetros internos de la cámara para identificar puntos comunes que puedan ser enlazados en al menos dos imágenes; la capa 2D producto del paso anterior, permite calibrar los parámetros externos de la cámara produciendo una capa inicial de puntos

tridimensionales que son ajustados en bloque para generar una nube densificada mediante acomodación estereoscópica (Revuelto et al., 2021). Las nubes de puntos finales están en formato LAS con la asignación de color RGB a cada punto, presentando una densidad espacial elevada que queda registrada en la Tabla 3. También se programó la obtención de ortomosaicos y Modelos Digitales de Terreno (MDT) y Modelos Digitales de Superficie (MDS) de alta resolución¹ en formato *Geo Tag Image File* (GeoTIF), además de un informe de calidad y precisión de los procesos ejecutados.

A partir de los datos obtenidos con la cámara multiespectral *Micasense Altum* usada los días 4 y 5 de abril de 2022, se generó el índice de vegetación *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) para las tres zonas de seguimiento. Este índice usa la diferencia normalizada de la banda del Rojo (RED) contra el Infrarrojo Cercano (NIR) (expresión (1)), para reportar valores que van desde -1 a 1. Los valores más elevados de NDVI, denotan una mayor reflectancia de estos rangos del espectro electromagnético debido al contenido clorofílico de la vegetación, permitiendo diferenciar la vegetación más sana y vigorosa de otras coberturas del suelo (Rouse et al., 1974).

$$NDVI : \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

Esta información fue posteriormente empleada para evaluar la distribución espacial del dosel arbóreo generado a partir de las nubes de puntos, proceso que es detallado en la siguiente sección. Todas las nubes de puntos, MDS, MDT y ortomosaicos generados por el programa Pix4D, fueron obtenidos en el sistema europeo de referencia terrestre 1989 (ETRS 89) usando la proyección UTM 30 N.

3.2.1 Espesor de nieve (suelo vs dosel)

La determinación de los mapas de profundidad de nieve se hizo a partir de las nubes de puntos tridimensionales. El programa utilizado para ello fue *CloudCompare* versión 2.12, que presta una amplia gama de funciones para el tratamiento de archivos de superficies tridimensionales. Con este programa fueron generadas las siguientes capas para cada uno de los vuelos recogidos en la Tabla 3:

¹ La resolución inicial de las capas ráster correspondiendo al valor de GSD (cm/px) del procesamiento de cada proyecto.

Tabla 3. Características de las nubes de puntos obtenidos para cada una de las zonas de estudio.

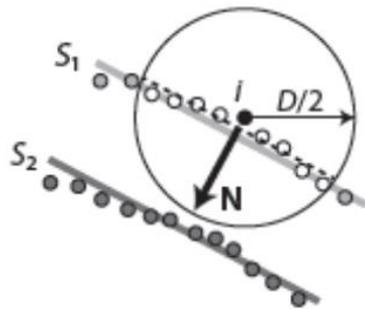
Zona	Nombre	Presen- cia de nieve	Número total de puntos	Densidad por m ³
FL11	19/11/2020	No	2.619.208	9,9
	19/01/2021	Si	4.742.742	19,1
	16/02/2021	Si	3.916.163	23,2
	10/03/2021	Si	4.985.712	28,1
	08/06/2021	No	678.924	25,9
	04/05/2022	Si	26.539.231	131
FI12	19/01/2021	Si	5.933.791	34
	16/02/2021	Si	8.894.647	34,6
	16/02/2021_0184	Si	7.488.426	28
	10/03/2021	Si	10.820.742	39,39
	08/06/2021	No	8.610.297	31,6
	04/05/2022	Si	16.492.133	137,6
FI22	19/01/2021	Si	12.604.336	27,4
	16/02/2021	Si	10.768.871	26,1
	10/03/2021	Si	1.250.698	28,37
	08/06/2021	Si	8.383.234	26,6
	04/05/2022	Si	56.866.594	162,5

- Superficie sin vegetación: Corresponde a la capa que representa la superficie del suelo tras eliminar o filtrar elementos como árboles, arbustos o rocas de tamaño medio de la superficie que reproducen las nubes de puntos. Para ello se ejecutó el filtro *Cloth Simulation Filtering Algorithm CSF* (Zhang et al., 2016), que genera una malla virtual invertida en las cotas más bajas de la nube, y que tras determinar los valores de menor peso (altitud), es capaz de filtrar la superficie del suelo, que corresponden a los valores más altos de dicha malla virtual invertida. Tras diversas pruebas para evaluar la capacidad del filtro CSF, se determinó que muestra mejores resultados al trabajar a una resolución espacial de 0.5 metros con una interacción máxima de 500 veces y un límite (*classification threshold*) de 0.2 m. Una vez aplicado el filtro y con el propósito de eliminar posibles valores atípicos, principalmente en las zonas de influencia del dosel arbóreo, se empleó el filtro de paso bajo *Statistical Outlier Removal SOR*. Este método, fue aplicado tanto en los vuelos con presencia de nieve como aquellos con ausencia de esta. Ello permite tener superficies directamente comparables para posteriormente computar el espesor de nieve.
- Estructura del dosel arbóreo: Esta capa representa la estructura arbórea de las diferentes zonas de las laderas estudiadas. Para ello se realizó una composición en falso color de los niveles digitales de color RGB de las nubes de puntos mediante la herramienta *convert to scalar field*. La composición empleada fue el promedio de los tres canales $((R+G+B) / 3)$ que

posteriormente fue usada para filtrar los puntos correspondientes a la vegetación con la herramienta *Filter Value* de *Cloud Compare*. Los valores para esta clasificación de la masa forestal dependieron de las condiciones de iluminación ambiental para cada vuelo por lo que variaron entre 2 a 80 del *scalar field*, resultante de la composición del RGB. Finalmente, los puntos clasificados como masa arbórea en todos los vuelos fueron fusionados con la herramienta *merge multiple point* buscando contar con una mayor densidad de puntos.

- Espesor del manto de nieve: calcula la distancia entre los puntos que representa la superficie de nieve y el suelo sin nieve. Para ello se emplearon las capas de superficie del terreno sin dosel forestal, tras aplicar los filtros anteriormente descritos en las fechas de muestreo cubiertas por nieve, y se compararon con la capa producto del vuelo sin nieve del 8 de junio de 2021. El plugin de *Cloud Compare* empleado para calcular la distancia entre nubes de puntos fue *Multiscale Model to Model Cloud Comparison M3C2* (Lague et al., 2013), que mediante una ventana cilíndrica virtual compara las diferencias entre las dos nubes con el método de vecino cercano (Figura 6). El radio del cilindro de búsqueda vario entre los 1,5 a 4 m en función de las características intrínsecas de cada una de las nubes correspondiendo al valor recomendado por el programa.

Step 1 (M3C2): Calculation of normal \mathbf{N} at a scale D around the core point i in cloud S_1 .



Step 2 (M3C2): Average distance between the two cloud measured along \mathbf{N} between mean points i_1 and i_2 , derived at a scale d .

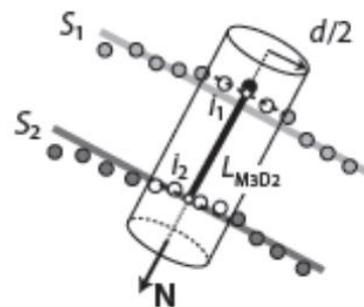


Figura 6. Representación esquemática del proceso de búsqueda de las direcciones locales normales de los puntos mediante el plugin M3C2. Tomado de James et al., 2017.

- Altura de las copas de los árboles / Canopy Height: Se calculó la diferencia altitudinal entre la nube de puntos correspondiente al suelo sin presencia de nieve y la capa correspondiente a la estructura del dosel forestal. Para ello, se visualizaron de manera simultánea ambas capas en *Cloud Compare* con los campos de altitud de los puntos directamente calculados en *Pix4D*. Tras ello se obtuvo una superficie *Triangular Irregular Networks* (TIN), obtenida con la herramienta *Delanuy 2.5* para la nube de puntos correspondiente al suelo desnudo, interpolando las zonas bajo el dosel forestal que fue previamente extraído. La altura de las copas de los árboles se obtuvo

al realizar la diferencia con la herramienta *Mesh to Cloud distance*, generando un Modelo Digital de alturas de las copas de los árboles respecto al suelo.

La rasterización de las capas correspondientes a los espesores de nieve, la estructura del dosel forestal y altura de árboles fueron exportadas a archivos *Geotiff* con una resolución espacial de 0,5 m buscando posibilitar el análisis estadístico y el computo con otras variables topográficas descritas en el siguiente apartado. La rasterización final fue realizada en el programa *CloudCompare*.

3.2.2. Variables topográficas y variables descriptivas del dosel forestal

A partir de los Modelos Digitales de Superficie, que tienen en cuenta las alturas de los diferentes elementos presentes en el terreno, y los Modelos Digitales de Terreno generados en los vuelos sin presencia de nieve, se obtuvieron las siguientes variables topográficas mediante el uso del programa *ArcGis 10.4.1*:

- Orientación / Aspect: Detalla la orientación de máxima pendiente de una determinada ladera. Esta orientación se obtiene en grados respecto al norte geográfico siguiendo el sentido horario y reportando valores que van de 0° a 360°. Para el cálculo de esta variable se empleó el MDT.
- Pendiente / Slope: Esta variable proporciona información del gradiente o tasa de cambio de altitud de cada píxel respecto a sus vecinos. Los valores están comprendidos entre 0 a 90 grados y el factor de Z o de altitud fue el predeterminado por el programa. Para el cálculo de esta variable se empleó el MDT.
- Radiación Solar Potencial / Solar Radiation: Computa la radiación solar potencial que llega a una superficie durante un periodo de tiempo determinado. La unidad usada fue vatios hora por metro cuadrado (WH/m²). El computo se realizó para la latitud 42° con una ventana de cielo uniforme de 200 x 200 píxeles. El periodo de radiación elegido fue del 1 de enero al 31 de mayo de 2021 (151 días) en promedios de 15 días cada 24 horas. El resto de los parámetros empleados fueron asignados por defecto siguiendo lo recomendado por el programa. Para el cálculo de esta variable se empleó el MDS.
- Topographic Position Index / TPI: Este índice indica la diferencia de altitud entre un determinado píxel respecto al promedio de altitud de celdas comprendidas en un entorno definido por el usuario (De Reu, et al., 2013). En este trabajo se eligió una ventana circular con radio de 20 m, dado que es la distancia con mayor relevancia para explicar la distribución de nieve en entornos de montaña pirenaicas (Revuelto et al., 2014). Los valores de TPI cercanos a 0 corresponden a superficies relativamente planas, los valores positivos a superficies elevadas o convexas y los valores negativos a superficies deprimidas o cóncavas. Para el cálculo de esta variable se empleó el MDT.

- *Maximum up windSlope parameter / Maxus-Sx*: Esta variable describe la exposición al viento de una determinada dirección, computando los obstáculos que podría encontrar en un radio de búsqueda específico (Winstral y Marks, 2002). Esta función reporta el ángulo promedio entre el horizonte y el punto analizado en una determinada ventana angular para una distancia de búsqueda específica. Los valores positivos indican zonas apantalladas del viento y los valores negativos aquellos que están expuestos. El radio de búsqueda para cada celda fue de 20 m tal como sugiere la literatura para estudiar el impacto de los árboles en las acumulaciones de viento (Winstral et al., 2013). El *Maxus-Sx* se calculó para 8 direcciones diferentes, comprendiendo ventanas angulares de 45°, permitiendo describir el apantallamiento en direcciones Norte (0°), Noreste, (45°), Este (90°), Sureste (135°), Sur (180°), Suroeste (225°), Oeste (270°) y Noroeste (315°). Para la obtención de esta variable se usó el programa creado por Adam Winstral, que se ejecuta por un *batch* en la aplicación de Símbolo del sistema de Windows y entrega como producto final un archivo ASCII que fue posteriormente convertido a *Geotiff* para su estandarización con las otras capas. Para el cálculo de esta variable se empleó el MDS.

Por otra parte, para determinar las variables descriptivas de la masa arbórea en donde se clasifiquen espacialmente las zonas boscosas abiertas de mayor o menor tamaño respecto al límite con el dosel arbóreo, fue necesario generar una capa que determina la distancia de los diferentes píxeles del límite forestal hacia las áreas desprovistas de esta, que corresponden a zonas de claros o zonas suficientemente alejadas de los árboles como para considerarlas fuera de su influencia.

La capa *Distance Canopy Edge / (DCE)*, fue generada mediante el uso de un algoritmo descrito por Mazzotti et al. 2019 (*script* implementado en el programa *MatLab* y disponible en este repositorio: [github.com/GiuliaMazzotti / DCE-algorithm](https://github.com/GiuliaMazzotti/DCE-algorithm)). Esta rutina detecta los límites de las copas de los árboles a partir de una capa binaria de presencia/ausencia de dosel arbóreo y calcula la distancia de cada píxel al límite de los árboles más cercano.

La capa de entrada correspondió a la altura del dosel arbóreo o Modelo Digital de Superficie Normalizado definiendo como límite los píxeles con alturas superiores a 2 m por lo que no se tuvo en cuenta los árboles más jóvenes y las masas arbustivas siguiendo el criterio ampliamente extendido por las referencias bibliográficas consultadas (Currier y Lundquist, 2018, Tennant et al., 2017, Mazzotti et al., 2019). Por último, se determinaron las alturas máximas promedio de las masas forestales usando como máscara el NDVI generado el 4 y 5 de mayo de 2022. Mediante el programa *ArcGis 10.4.1* se aplicaron las herramientas geoespaciales de *Dissolve* y *Zonal statistics* para obtener los valores medios reportados en la tabla 1.

La capa DCE se empleó finalmente para clasificar el terreno con los siguientes criterios teniendo en cuenta las alturas promedio de los árboles en cada una de las zonas de los flancos estudiados, basados en aplicaciones en otras áreas de estudio (Pomeroy et al., 2008):

- Claros amplios/ *Large gaps*: Píxeles con un DCE comprendido entre la altura promedio de los árboles del flanco y dos veces la altura promedio de los árboles.
- Claros pequeños/ *Small gaps*: Píxeles con un DCE comprendido entre la altura promedio de los árboles del flanco y la mitad de la altura promedio de los árboles.
- Límite del dosel forestal/ *Canopy Edge*: Píxeles con DCE inferior a cero y por tanto situados bajo el dosel forestal.
- Zonas abiertas de gran extensión/ *Open areas*: Píxeles fuera del bosque con un DCE superior a dos veces la altura promedio de los árboles del flanco analizado.
- Área Total/ *All*: Corresponde al área total comprendida por la capa.

Al igual que con las capas de espesor de nieve, las variables topográficas y las variables descriptivas de los árboles fueron exportadas como capas ráster *GeoTiff*, en el sistema europeo de referencia terrestre 1989 (ETRS 89) usando la proyección UTM 30 N y con una resolución espacial de 0,5 m.

3.2.3. Validación de la información

Medición de espesores de nieve en terreno

Durante la campaña de campo realizada durante el 4 y 5 de mayo de 2022, se realizaron cuatro observaciones de espesor de nieve con una sonda manual en medio de la zona 22 del flanco este. El muestreo consistió en la medición de profundidad de nieve en un punto específico realizando replicas equidistantes en una retícula de 1 x 1 m en un cuadrado de 3 x 3 m, obteniéndose 9 a 11 observaciones en cada localización muestreada. Esta información fue comparada con los valores de los píxeles de las capas de espesor de nieve para el 5 de mayo de 2022, extrayendo la información de todos píxeles contenidos en la ventana de 3x3m en torno a la localización del sondeo manual.

Validación Kappa de la masa forestal obtenida

El NDVI fue obtenido para cada una de las zonas estudiadas durante el 4 y 5 de mayo de 2022 y fue empleado para evaluar la espacialización del dosel arbóreo mediante el computo del coeficiente *Kappa* y *Agreement* (Zangiabadi et al., 2011). Para ello, ambas capas, NDVI y altura del dosel forestal, fueron binarizadas (0 ausencia de árbol, 1 presencia de árbol). Dicha clasificación se realizó con tres combinaciones de distinto umbral para así delimitar qué valores permiten una mejor caracterización espacial de la presencia/ausencia de árboles. Los umbrales fueron los siguientes: NDVI a 0,6 – *Tree Height*: 1m; NDVI a 0,5 – *Tree Height*: 2m; NDVI 0,6; *Tree Height*: 2m.

3.2.4. Análisis geoestadísticos de las capas mediante *R studio*.

El análisis estadístico de las capas geoespaciales fue realizado mediante el programa *R studio* 4.2.1. Se ajustaron las líneas de código usados en Revuelto et al., 2022, para obtener el promedio y la desviación estándar de las capas de espesor de nieve de cada una de las fechas estudiadas. Además, se obtuvieron las categorías definidas con el DCE para cada una de las zonas de seguimiento en los flancos y se calcularon medidas de tendencia central de los valores obtenidos que fueron representados mediante diagramas de bigotes. Por otra parte, se calculó una correlación *Kendall* entre las capas de espesor de nieve y las variables topográficas y variables descriptivas de los árboles, con el fin de conocer su relación estadística. Este método fue elegido debido a la distribución *log-normal* del manto nival en zonas de montaña (Jonas et al. 2009), aceptándose que las correlaciones eran significativas o con un 95% de confianza cuando el *p value* era menor de 0.05.

Las correlaciones se calcularon de manera iterativa, extrayendo aleatoriamente 100 muestras en cada una de las capas en donde fue calculado el parámetro *Kendall's Tau* (Royston, 1992), repitiendo el mismo cálculo 1000 veces para finalmente obtener el valor medio de las 1000 correlaciones. Este valor final fue empleado para analizar la correlación entre la distribución espacial del manto de nieve y las diferentes variables calculadas.

Previo a los análisis geoestadísticos, las capas ráster fueron recortadas mediante un *batch* de la herramienta *ArcGis* para obtener la misma cantidad de filas y columnas y asegurar que las celdas de todos los campos fueran coincidentes en cada una de las zonas de estudio, manteniendo el sistema de georreferenciación antes descrito. El identificador de cada capa en el análisis geoestadístico correspondió al nombre del producto generado en inglés (incluido en cursiva en la definición de variables en la sección 3.2.2.).

4. RESULTADOS

4.1. Validación de las capas geoespaciales obtenidas en los geoprocesamientos

A continuación, se presentan los dos procesos de validación realizados a las capas de espesor de nieve y dosel arbóreo obtenidas mediante el análisis geoespacial realizado a las nubes de puntos tridimensionales:

4.1.1. Evaluación de espesores de nieve derivados con VANT usando mediciones manuales

La comparación de los valores de espesor de nieve hechos en el flanco este sector 2.2 con los espesores obtenidos mediante VANT en la misma zona, mostraron valores similares entre ambas observaciones. Sin embargo, los valores obtenidos con el VANT tienen una mayor dispersión (Figura 7).

La muestra de profundidad de nieve correspondiente al sondeo 1, expone un rango intercuartil variable y elevado respecto a su mediana, con una presencia alta de datos anómalos en comparación de las medidas puntuales obtenidas en campo. Excluyendo el sondeo y muestra 1 considerado como dato anómalo, entre las observaciones manuales y las del VANT el ajuste lineal tiene un R^2 de 0,93. Se muestra así buena correspondencia entre observaciones hechas en campo y los resultados obtenidos mediante el procesamiento de los productos del VANT.

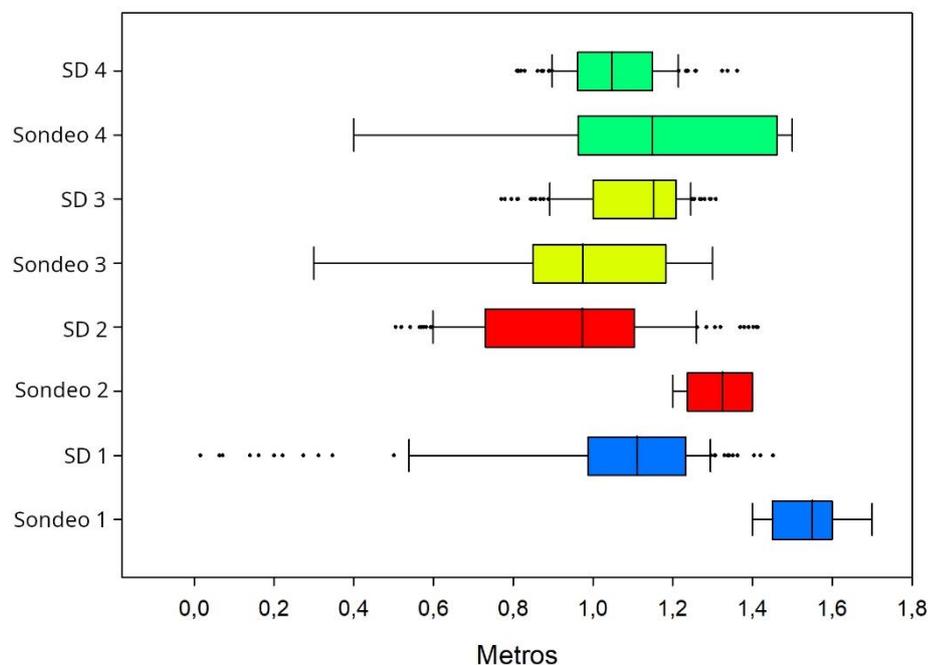


Figura 7. Diagrama de bigotes de los 4 sondeos realizados en campo contra las ventanas circulares de 3 m extraídas de la capa ráster de profundidad de nieve.

4.1.2. Evaluación de la máscara del bosque con el índice *NDVI*

La generación de nubes de puntos tridimensionales, presenta un reto en la determinación de la superficie que representa los árboles, debido a la reconstrucción mediante *SfM* de zonas con sombra y la posterior aplicación de filtros para eliminar puntos aberrantes. Además, la selección de umbrales para clasificar categóricamente el dosel arbóreo presenta una incertidumbre que es necesario evaluar estadísticamente. La validación *Kappa/agreement* permitió corroborar que la categorización de las zonas con árboles y su evaluación con las observaciones del índice *NDVI* generadas el 5 de abril de 2022 con la cámara multispectral, presentan los mejores resultados para un umbral de 2 m de altura de árbol *NDVI* superior a 0,6 (Tabla 4), para considerar una zona como cubierta por una masa arbórea. Con ello el *Agreement* entre las capas binarias de presencia /ausencia de árboles con ambos métodos es de 86,10 en promedio. Este criterio (2 m de altura en la capa de altura de dosel forestal), fue el empleado posteriormente para el computo del DCE, y por ello en adelante la capa del dosel forestal es referida como *Canopy Heigh 2m Up*.

Tabla 4. Resultados obtenidos en tres procesos de validación distintas.

Sector	<i>NDVI 0,6; Tree Height 1</i>		<i>NDVI 0,5; Tree Height 2</i>		<i>NDVI 0,6; Tree Height 2</i>	
	<i>Kappa</i>	<i>Agreement</i>	<i>Kappa</i>	<i>Agreement</i>	<i>Kappa</i>	<i>Agreement</i>
Ladera Oeste 1.1	0,44	76,99	0,54	82,22	0,47	80,88
Ladera Oeste 1.2	0,56	90,35	0,63	90,59	0,56	90,35
Ladera este 2.2	0,55	86,57	0,51	85,17	0,506	87,08
Promedio	0,52	84,64	0,56	85,99	0,51	86,10

4.2. Distribución espacial del manto de nieve: Evolución de los espesores medios en los flancos

A partir de la metodología detallada anteriormente se calcularon los mapas de espesor de nieve en cada una de las laderas estudiadas para las diferentes fechas con vuelo de VANT en presencia de nieve. La ladera Este presentó mayor acumulación de nieve promedio en el periodo estudiado con 0,88 m (zona 2.2), seguido por la ladera Oeste con 0,72 m como valor medio (0,74 m y 0,70 m, en las zonas 1.1 y 1.2 respectivamente). El 16 de febrero de 2021 es la fecha con mayor acumulación de nieve con un promedio de 1,05 m, ubicándose a su vez en la vaguada térmica de los periodos invernales analizados con las temperaturas más bajas (Figura 4). Fue precedida por el 10 de marzo de 2021 con 0,75 m, el 4 y 5 de mayo de 2022 con un promedio de 0,70 m y finalmente 0,60 m el 19 de enero de 2022, mostrándose una mayor profundidad de nieve al final de la temporada de estudio, lo cual demuestra que las cantidades de nieve siguen incrementando hasta marzo y con ello la fusión sigue siendo limitada hasta esta fecha. Es necesario destacar que las observaciones del 4 y 5 de mayo de 2022 no pueden relacionarse con los espesores acumulados en el año 2021.

Por otra parte, La zona *Open areas* ostenta los valores máximos promedio de todo el periodo de estudio con 0,99 m, seguido por la zona *Large gaps* (0,92 m), *Small gaps* (0,87 m) y *Canopy Edge* (0,78 m), corroborando el patrón de distribución espacial esperado. Las diferencias encontradas entre las distintas zonas analizadas, en promedio, no son muy elevadas. Pueden destacarse diferencias de 0,22 m entre la zona *Open* frente al *Canopy Edge* y de tan solo 0,05 m entre el *Large gaps* y el *Small gaps*. El valor porcentual de variación del *Open areas* respecto al *Canopy Edge* fue de 21,8% y del *Large gaps* respecto al *Small gaps* de 5,61%.

En la Tabla 5, se presentan los espesores promedio observados en cada una de las cuatro categorías para todos los días de estudio y en los tres flancos analizados. Se destaca que en algunas fechas de medición y en zonas de flancos específicas, se presentan diferencias de espesor de nieve muy reducidas y en algunos casos llegando a presentar mayor espesor en la categoría *Canopy Edge* frente a las zonas *Small gaps*, *Large gaps* e inclusive *Open areas*. A continuación, se presente un análisis de las diferencias observadas en cada una de las zonas de las laderas a lo largo del periodo de estudio.

Tabla 5. Espesor medio de la nieve (\bar{x}) y su desviación estándar (Σ) por zona de las laderas estudiadas.

Zona	categoría	19/01/2021		16/02/2021		10/03/2021		04-05/05/2022		Promedio	
		\bar{x}	Σ	\bar{x}	Σ	\bar{x}	Σ	\bar{x}	Σ	\bar{x}	Σ
Ladera Oeste Zona 1.1	<i>Canopy Edge</i>	0,63	0,26	1,17	0,56	0,51	0,23	0,40	0,19	0,68	0,31
	<i>Small gaps</i>	0,66	0,21	1,00	0,35	0,58	0,25	0,45	0,20	0,67	0,25
	<i>Large gaps</i>	0,74	0,23	0,99	0,36	0,63	0,26	0,45	0,19	0,70	0,26
	<i>Open areas</i>	0,78	0,22	1,02	0,34	0,67	0,27	0,40	0,19	0,72	0,25
	<i>All</i>	0,72	0,23	1,01	0,36	0,63	0,26	0,42	0,19	0,70	0,26
Ladera Oeste Zona1.2	<i>Canopy Edge</i>	0,75	0,29	1,29	0,47	0,95	0,33	0,65	0,28	0,91	0,34
	<i>Small gaps</i>	0,82	0,25	1,29	0,31	1,14	0,30	0,77	0,29	1,01	0,29
	<i>Large gaps</i>	1,01	0,27	1,41	0,38	1,41	0,30	1,02	0,33	1,21	0,32
	<i>Open areas</i>	1,12	0,31	1,60	0,49	1,62	0,35	1,13	0,33	1,37	0,37
	<i>All</i>	1,01	0,30	1,47	0,44	1,47	0,37	0,96	0,34	1,22	0,36
Ladera Este Zona 2.2	<i>Canopy Edge</i>	0,47	0,21	1,07	0,38	0,67	0,26	0,75	0,30	0,74	0,29
	<i>Small gaps</i>	0,63	0,18	1,10	0,30	1,00	0,32	0,95	0,39	0,92	0,30
	<i>Large gaps</i>	0,54	0,18	1,06	0,30	0,86	0,27	0,90	0,34	0,84	0,27
	<i>Open areas</i>	0,65	0,21	1,05	0,36	1,01	0,40	0,89	0,47	0,90	0,36
	<i>All</i>	0,59	0,19	1,08	0,31	0,94	0,32	0,92	0,38	0,88	0,30
	\bar{x} & Σ total	0,60	0,21	1,05	0,35	0,75	0,28	0,70	0,29	0,77	0,28

4.2.1. Ladera Este (sector Fl.1.1)

Tanto el 21 de febrero como el 10 de marzo de 2021, presentaron valores superiores de espesor de nieve a medida que se incrementaba la distancia respecto al límite del dosel arbóreo, siguiendo el patrón categórico esperado, donde se encontraron mayores espesores en la zona *Open areas*, seguida de *Large gaps* y *Small gaps*. Sin embargo, el 16 de febrero de 2021 hubo un promedio (1,17m) y desviación estándar (0,56) mayor en el *Canopy Edge* que en el resto de las zonificaciones analizadas. En este día la distribución del espesor de nieve presentó menor simetría y una mayor cantidad de valores alejados de la mediana con la presencia de valores atípicos superiores que en las otras fechas analizadas (Figura 8), pudiéndose corroborar visualmente en el mapa de profundidad de nieve (Figura 9) para los 4 días con observación VANT.

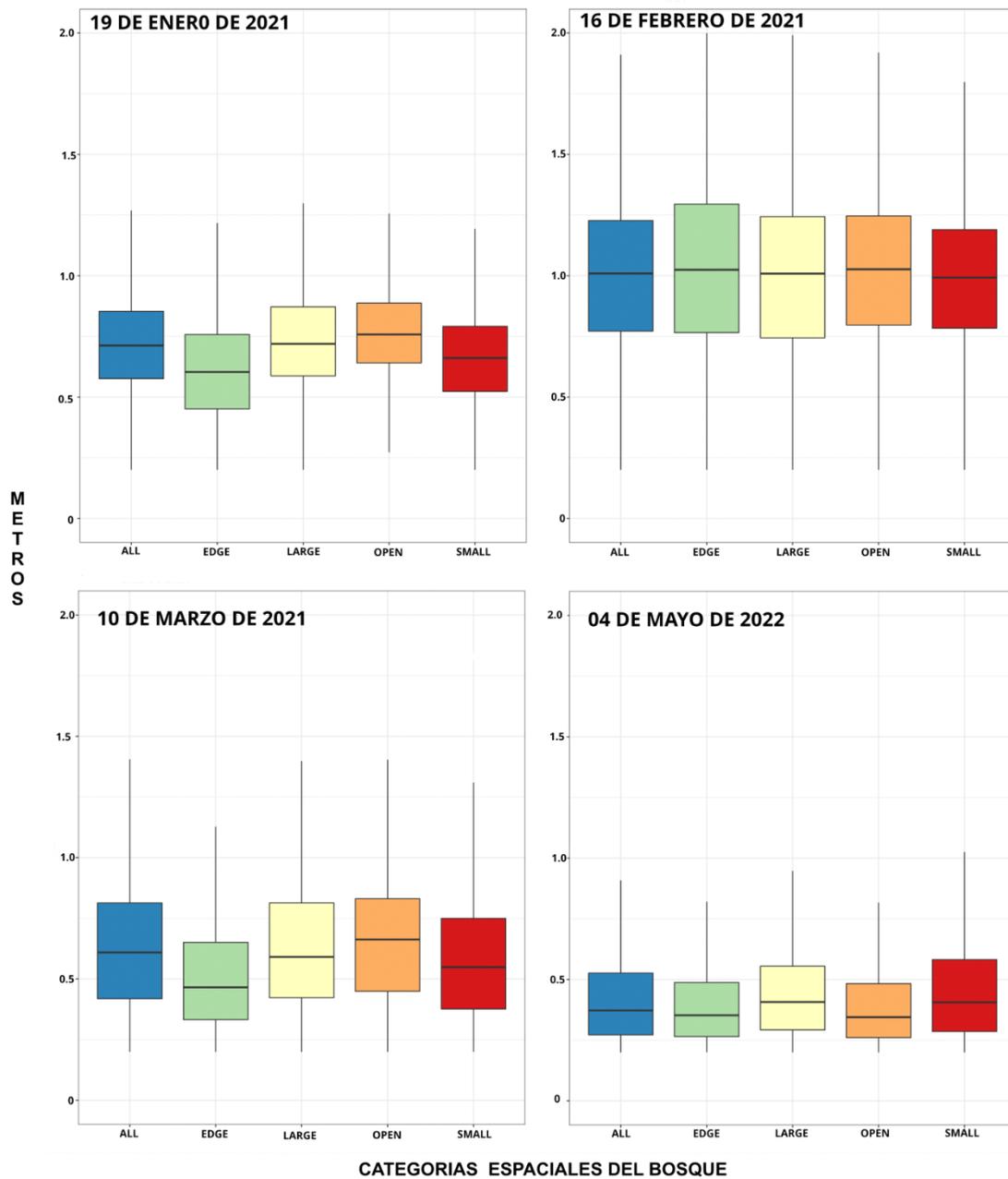
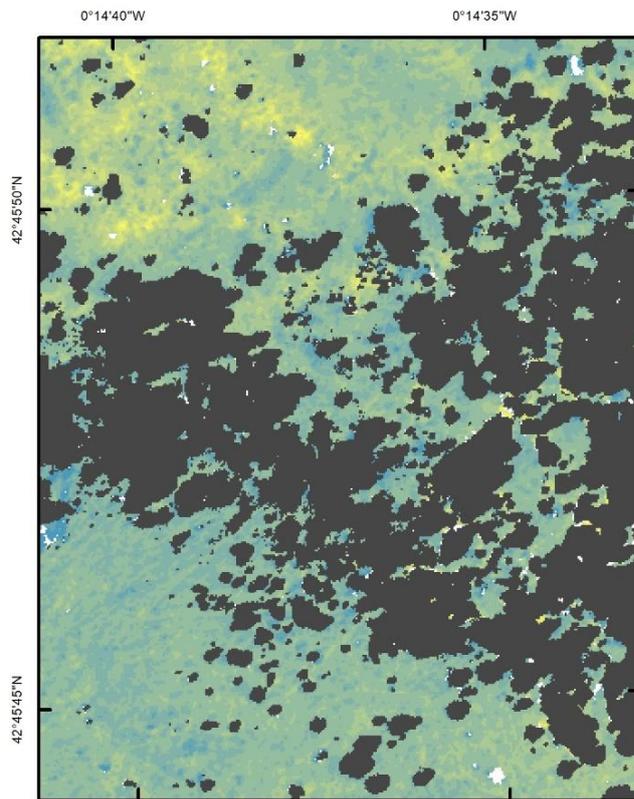
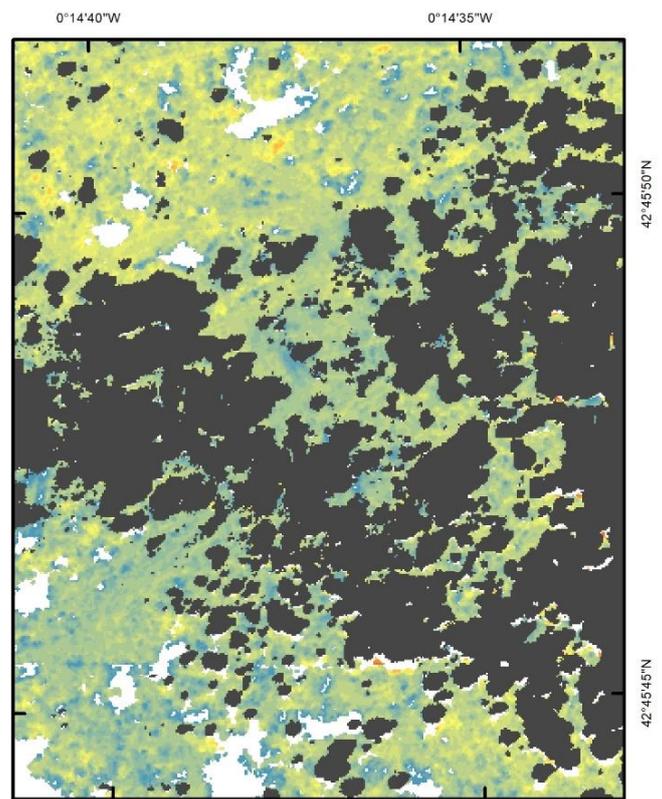


Figura 8. Diagrama de bigotes de la variación del espesor de nieve en cada una de las categorías espaciales definidas en la ladera oeste sector 1.1.

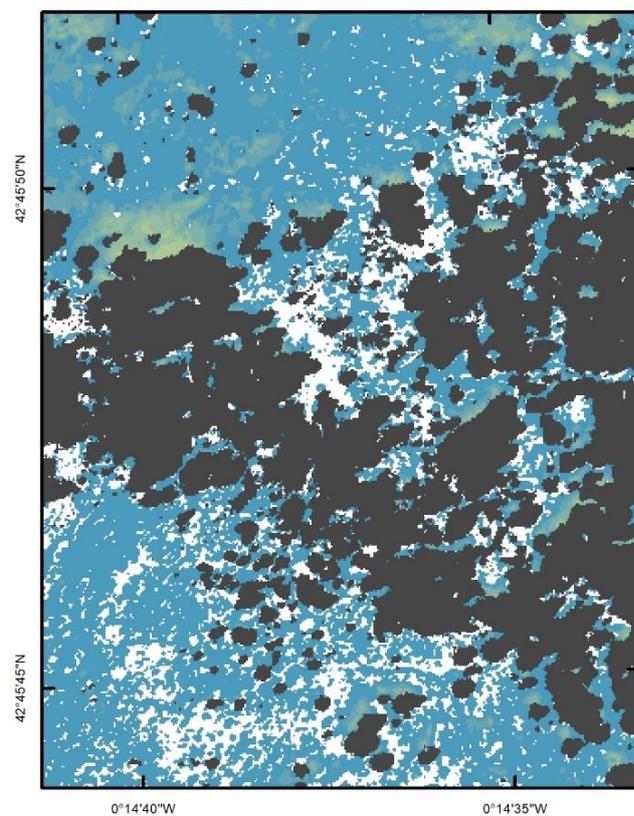
19 de enero de 2021



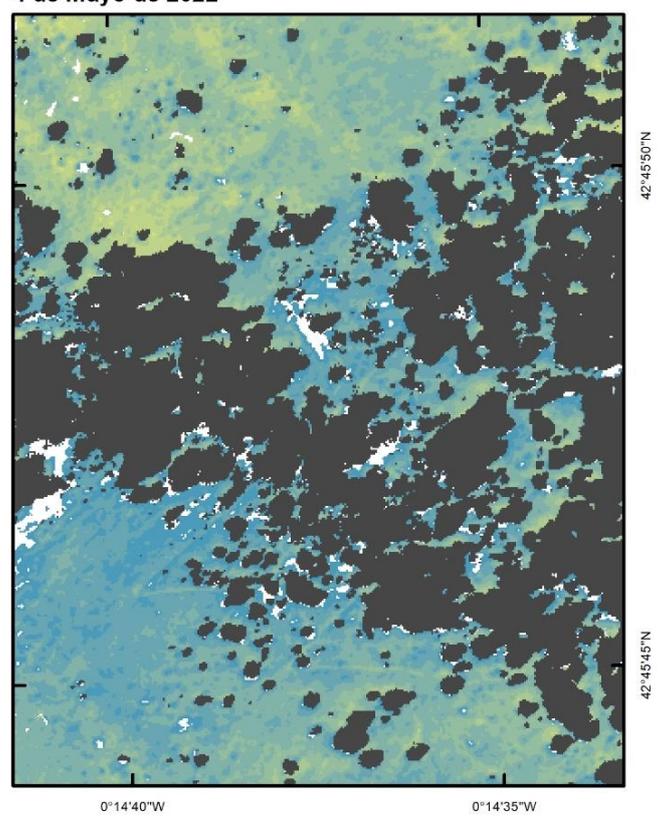
16 de febrero de 2021



10 de marzo de 2021



4 de mayo de 2022



Profundidad de nieve en metros

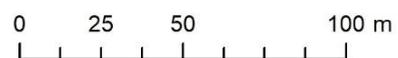
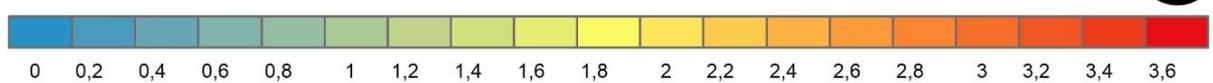


Figura 9. Mapa de profundidad de nieve en la ladera oeste sector 1.1 para cada una de las fechas estudiadas.

4.2.2. Ladera Este (sector Fl.1.2)

Todas las fechas siguieron un patrón de diferencia nival categórico esperado y soportado por la hipótesis de distribución del manto nival en la zonificación del ambiente forestal en este sector de la ladera oeste. Esta zona presenta una marcada transición entre la zona forestal y el paso a vegetación baja como arbustos, pastos y matorros propias de la franja superior del bosque subalpino. El porcentaje de cambio promedio fue el más alto de todos los sectores de estudio, con una variación de la profundidad de nieve del 33,3 % entre la zona *Small gaps* y la zona *Canopy Edge* y del 16,9 % entre las zonas clasificadas como *Small gaps* y *Large gaps*. Tan solo en el 16 de febrero de 2021 se presentaron valores medios análogos (1,29 m) en las categorías *Small gaps* y *Edge gaps* (Tabla 5), pero en las otras categorías las diferencias entre las acumulaciones de nieve observadas son equivalentes.

La transición ente las distintas categorías espaciales puede explicar la morfología de los datos con cierta simetría en todas las fechas de análisis, con el rango intercuartílico más robusto el 19 de enero de 2021 (figura 10). El mapa de profundidad de nieve del 4 de mayo de 2022 muestra menor extensión, debido a la menor superficie cubierta en el vuelo fotogramétrico por condiciones atmosféricas desfavorables en el momento de la adquisición (fuerte viento que obligó a detener el vuelo del VANT) (figura 11).

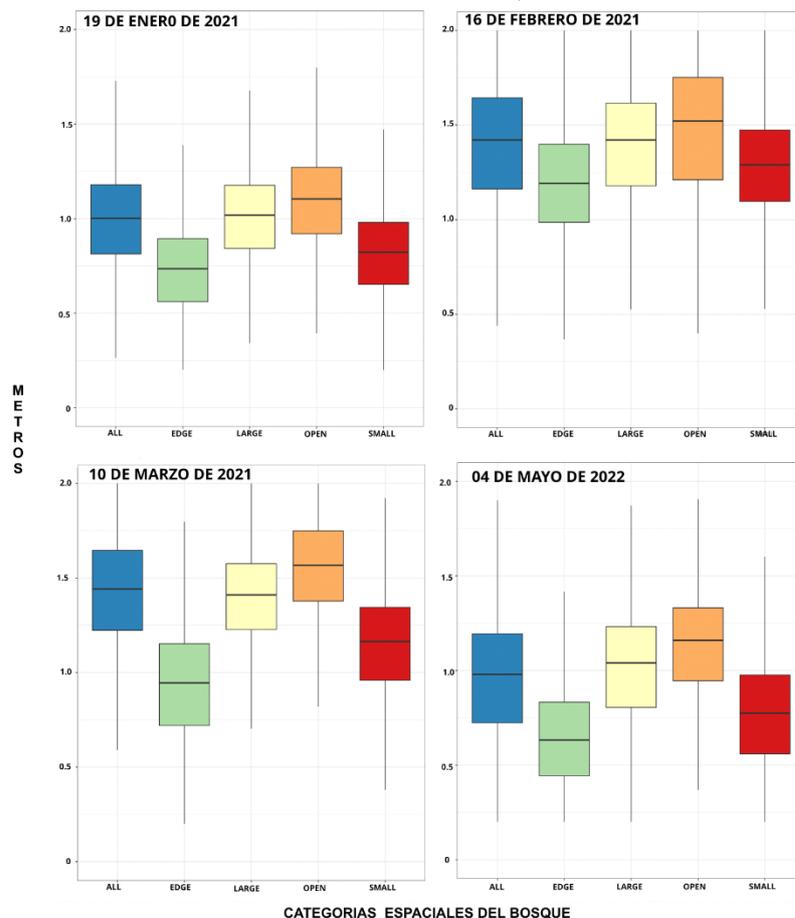
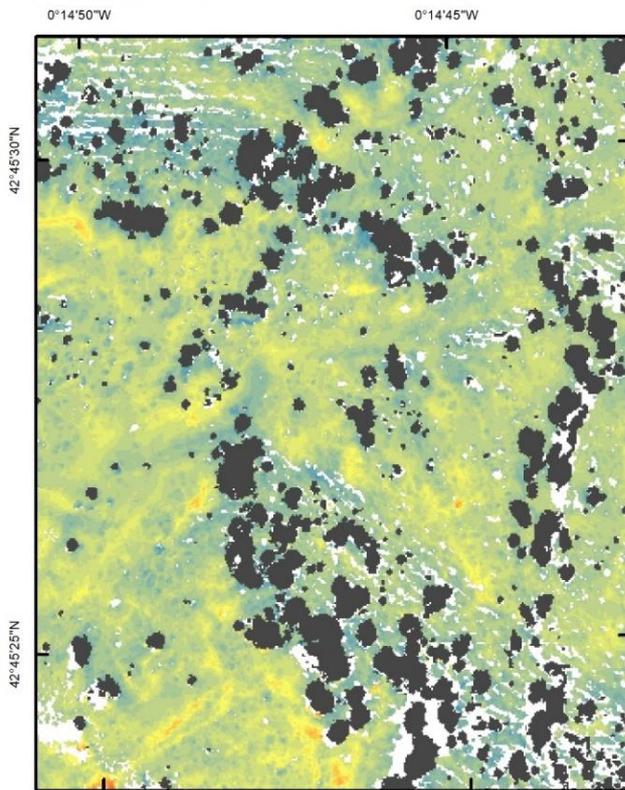
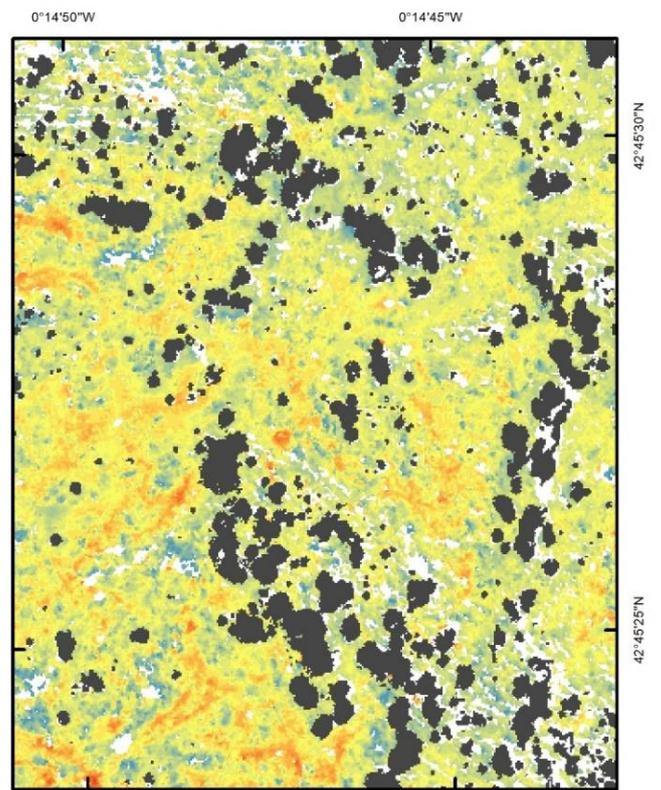


Figura 10. Diagrama de bigotes de la variación de profundidad de nieve en cada una de las categorías espaciales definidas en la ladera este sector 1.2.

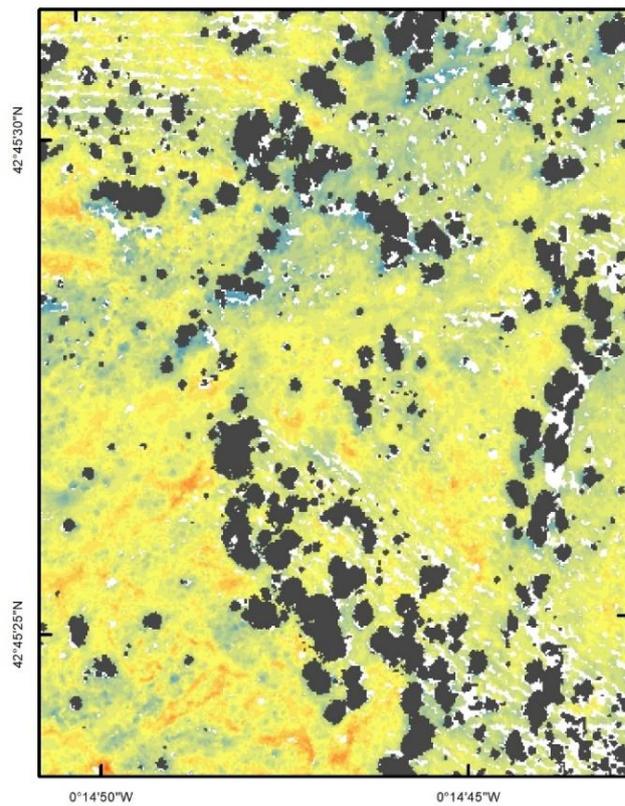
19 de enero de 2021



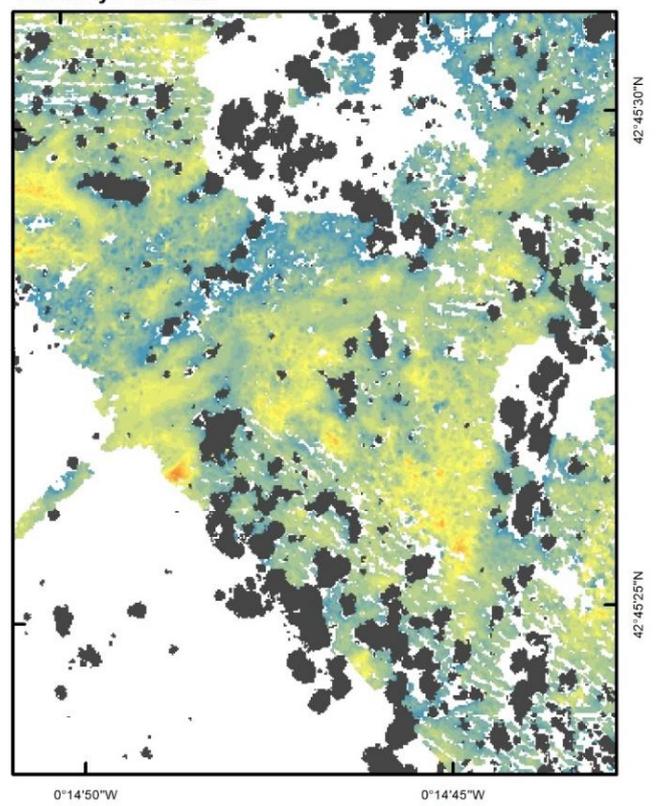
16 de febrero de 2021



10 de marzo de 2021



4 de mayo de 2022



Profundidad de nieve en metros

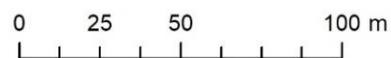
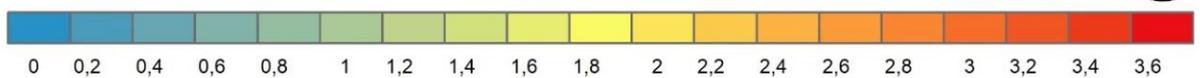


Figura 11. Mapa de profundidad de nieve en la ladera este sector 1.2 para cada una de las fechas estudiadas.

4.2.3. Ladera oeste (Fl.2.2)

En esta ladera también se evidencia un patrón de espesor con valores superiores de nieve a medida que se incrementaba la distancia al límite del dosel arbóreo, afirmando la hipótesis establecida para las diferentes categorías espaciales. Los datos con mayor robustez, simetría y cercanía respecto a la mediana corresponden al 19 de enero de 2021 (figura 11). No obstante, el 16 de febrero de 2021 denota un patrón irregular respecto a las categorías clasificadas, con un promedio de nieve en la categoría *Edge gaps* (1,07 m) superior al *Large gaps* (1,6 m) y el *Open areas* (1,5 m). Es de destacar que la categorización de las zonas *Small gaps*, *Open areas* y *Large gaps* en esta ladera, se realizaron con las mayores distancias debido a la superior altura promedio de los árboles. La diferencia entre las categorías *Small gaps* y *Large gaps* fue de 8,39 m y de un 17,5 m entre el *Open areas* y el *Canopy Edge* superando la media total de todas las laderas.

La interpretación visual de la cartografía en este flanco refuerza la gran variabilidad espacial de la nieve en función no solo de la distancia a la masa arbórea, sino a las características topográficas del terreno como los drenajes y laderas expuestas al viento (figura 12).

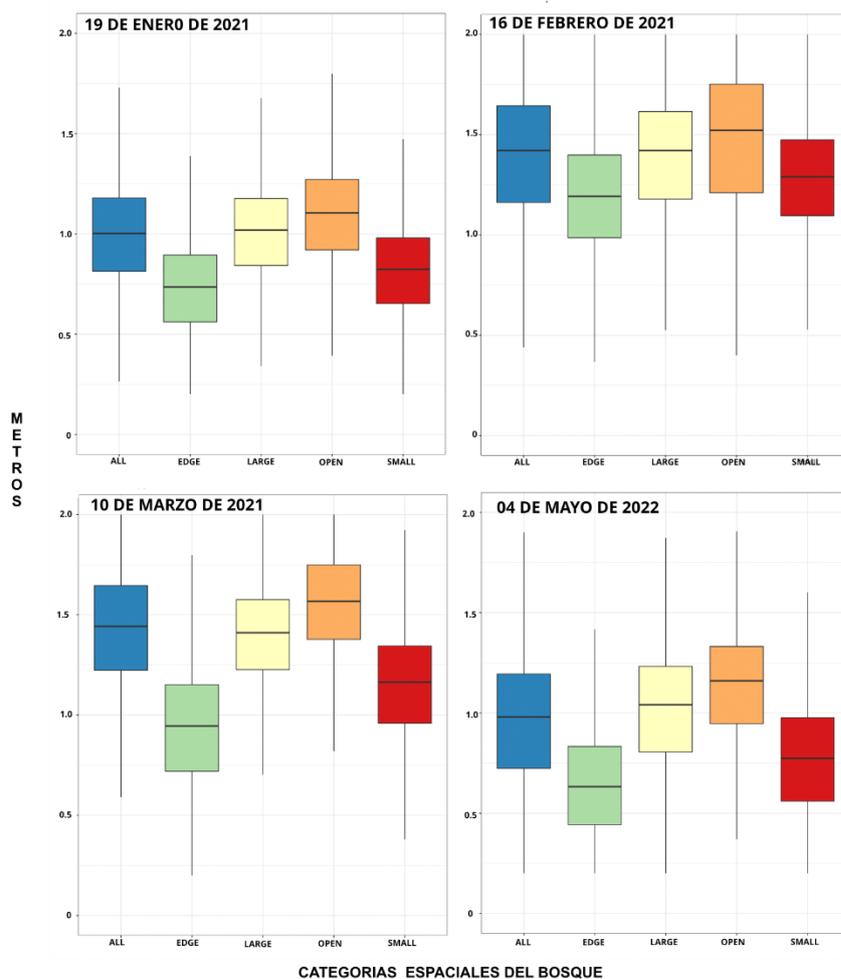
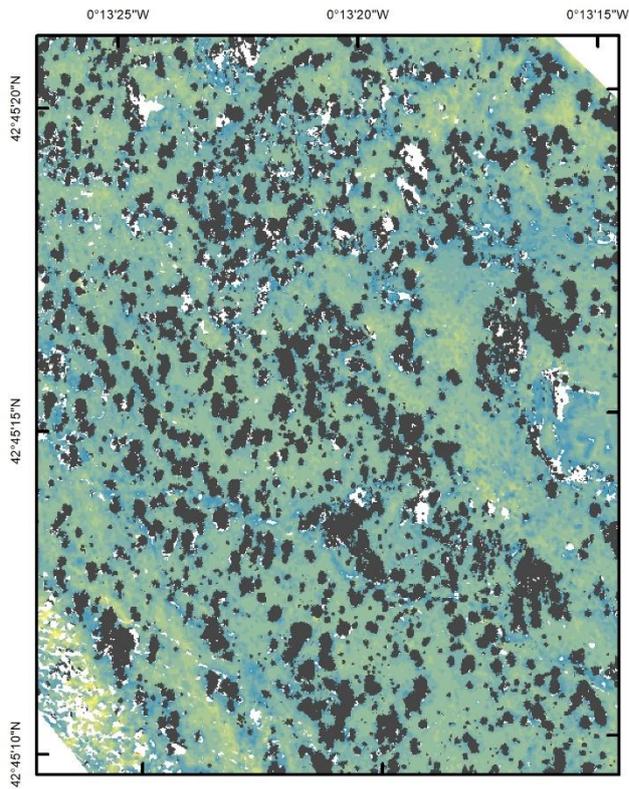
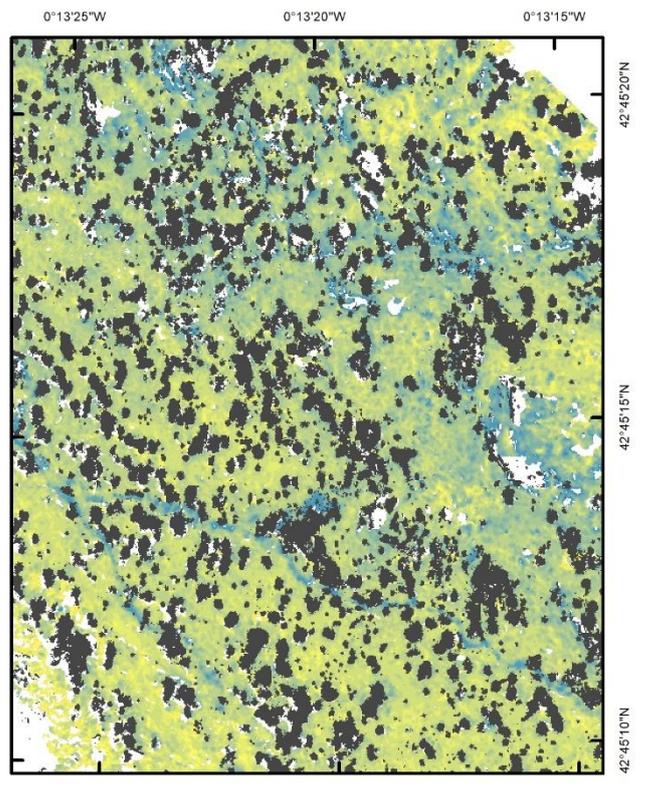


Figura 11. Diagrama de bigotes de la variación de profundidad de nieve en cada una de las categorías espaciales definidas en la ladera este sector 2.2.

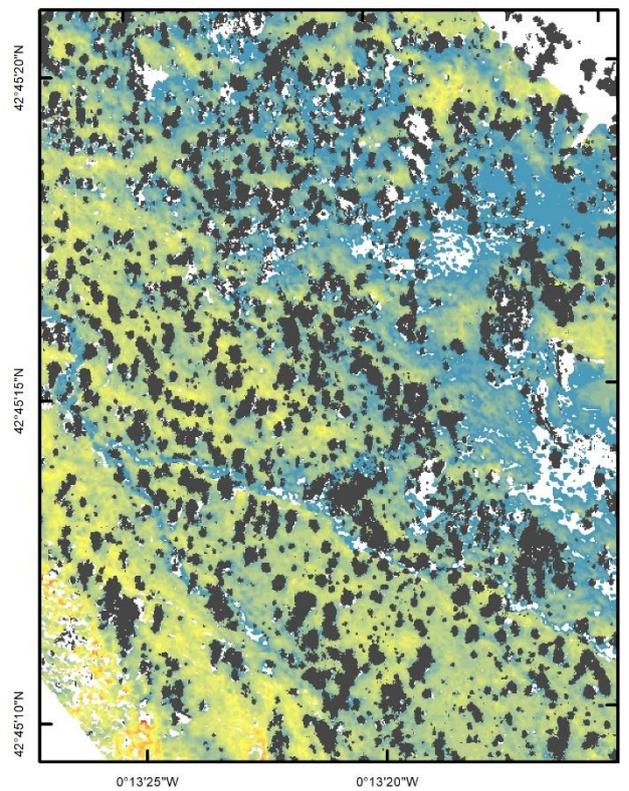
19 de enero de 2021



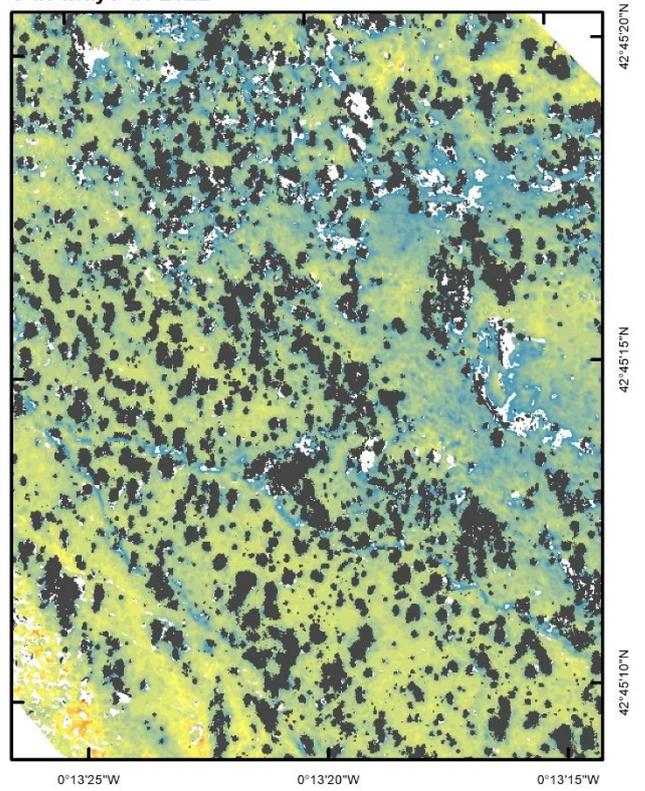
16 de febrero de 2021



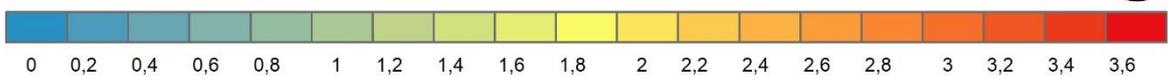
10 de marzo de 2021



5 de mayo de 2022



Profundidad de nieve en metros



0 40 80 160 m



Figura 12. Mapa de profundidad de nieve en la ladera oeste 2.2 para cada una de las fechas estudiadas.

4.3. Correlaciones entre variables topográficas y descriptivas del dosel forestal con el espesor de nieve

A partir de los resultados obtenidos en las correlaciones *Kendall* entre variables topográficas y las métricas del dosel forestal respecto al espesor de nieve, es posible analizar la relevancia de las diferentes variables de cara a entender la distribución espacial del manto de nieve en la zona de estudio. En general, la variable que muestra una mayor correlación con el espesor de nieve es la exposición al viento, siendo la misma significativa para determinadas direcciones en los distintos días y flancos analizados. Las correlaciones con esta variable varían en función de la ladera determinada y orientación definida. Por otra parte, la variable *MDS* presentó correlaciones altas con la distribución de nieve en algunos días concretos, pero sin seguir un patrón claro como si lo hicieron las variables *Slope*, *TPI* y *Solar Radiation*, las cuales muestran una clara correlación negativa. Por otro lado, la variable *DCE* muestra una correlación positiva, aunque su presencia no fue significativa y acusada en las fechas de análisis. Se resalta la correlación positiva de la variable *Canopy Height 2m Up*² en las zonas *Open areas* y *Large gaps*. Por otra parte, la variable *Canopy Height* no presentó correlación con intervalos de confianza en ningún momento, justificando que la inclusión de vegetación baja no condicionaría la profundidad de nieve de manera significativa.

La gran viabilidad de procesos involucrados y sus respuestas en función del flanco y fecha de observación hacen necesario realizar una lectura separada y sistemática, haciendo énfasis en las categorías espaciales que clasifican las zonas de estudio definidas respecto a la distancia del límite del dosel arbóreo.

4.3.1 Categoría All

Se muestran a continuación los resultados para la categoría *All*, análisis de las zonas de estudio completas, en las tres laderas analizadas:

Ladera oeste sector 1.1

En el caso de la variable *Maxus-Sx* las correlaciones con el espesor de nieve varían en función de la dirección para la que son calculadas. Ejemplo de ello son las correlaciones negativas (-0.25) del *Maxus-Sx* con dirección 45° para tres fechas de observación, siendo la misma estadísticamente significativa y sugiriendo que con un viento predominante del sureste hay una acumulación de nieve superior a barlovento. Además, presenta correlaciones significativas con el *MDS* (0,28), mostrando mayores acumulaciones de nieve en zonas de mayor altitud. En el 16 de febrero de 2021 no se presentaron valores de correlación significativas para ninguna de las variables (figura 13).

² Es importante recordar que esta variable solo considera la altura del dosel arbóreo si son superiores a dos metros y por tanto elimina todas las posibles correlaciones con vegetación baja.

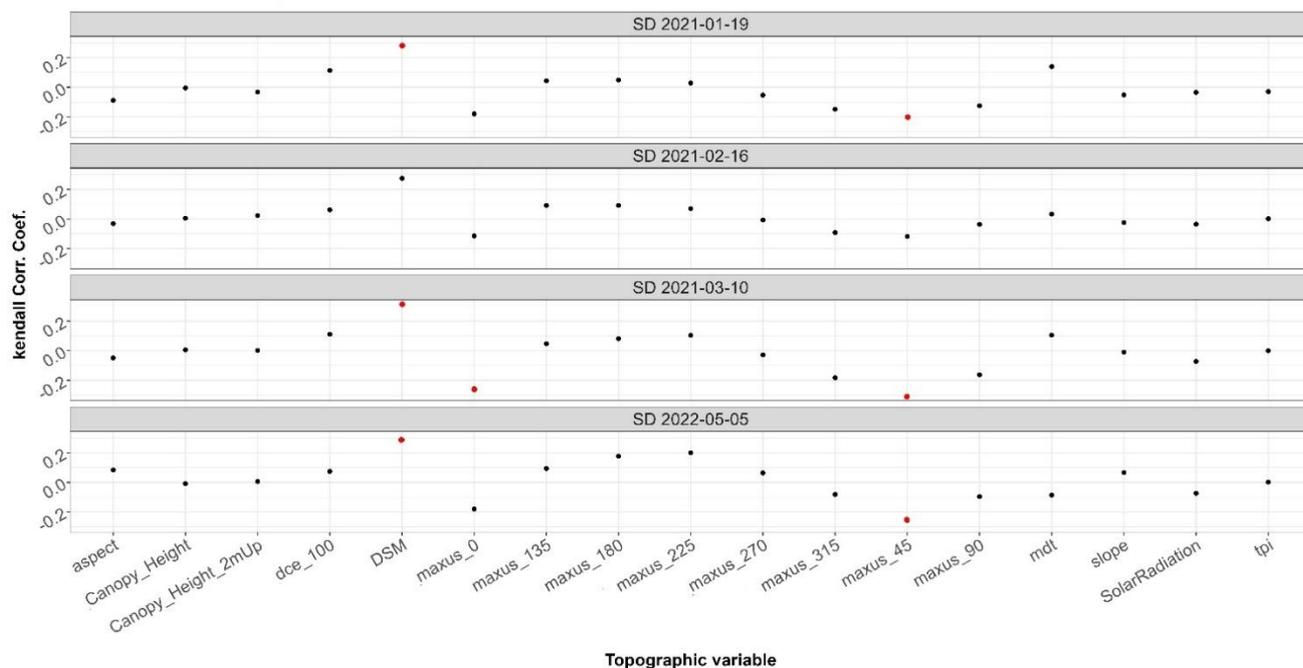


Figura 13. Correlaciones *Kendall* obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 1.1 de la ladera oeste incluyendo toda zona muestreada (*ALL*). Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% (p value < 0.05).

Ladera oeste sector 1.2

El sector 1.2 de la ladera oeste presentó correlaciones negativas diferentes respecto a su homólogo 1.1. En este caso, la variable *Maxus-Sx* con direcciones de 270, 315° y 0° presentaron correlaciones negativas (-0,27) y significativas para diferentes días de nuestro sugiriendo que la dirección del viento presenta un leve cambio de orientación hacia el noroeste que favorecerían la acumulación a barlovento. La variable TPI tuvo valores con correlaciones negativa (-0,21) aseverando que hay una tendencia a la acumulación en zonas deprimidas y cóncavas mayor que respecto a las planas o convexas (figura 14).

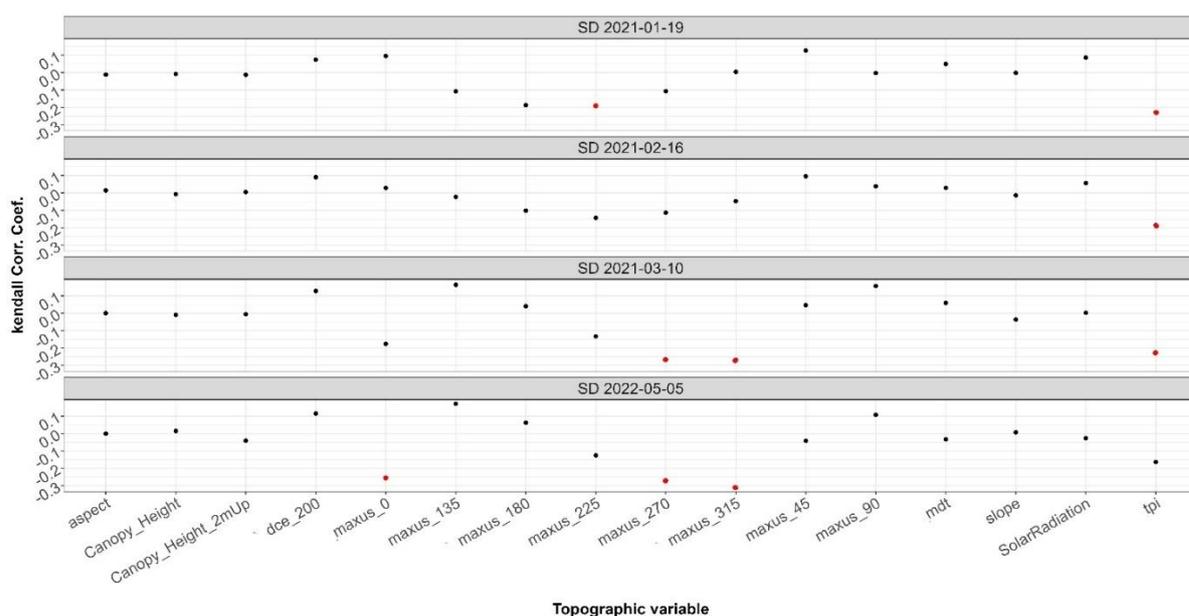


Figura 14. Correlaciones *Kendall* obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 1.2 de la ladera oeste incluyendo toda zona muestreada (*ALL*). Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% (*p value* <0.05).

Ladera este sector 2.2

En esta zona de la ladera, se obtiene para el 5 de mayo de 2022 el mayor número de correlaciones estadísticamente significativas al considerar todas observaciones, pero sin atender a la categorización proveniente del dosel forestal. En este caso, las zonas a sotavento para vientos provenientes del suroeste muestran una correlación significativa positiva para direcciones 180° y 225° (0,24 de promedio), que favorecen la presencia de mayor cantidad de nieve. Por otra parte, las variables *Solar Radiation* y *Slope* tuvieron correlaciones negativas estadísticamente significativas (figura 15).

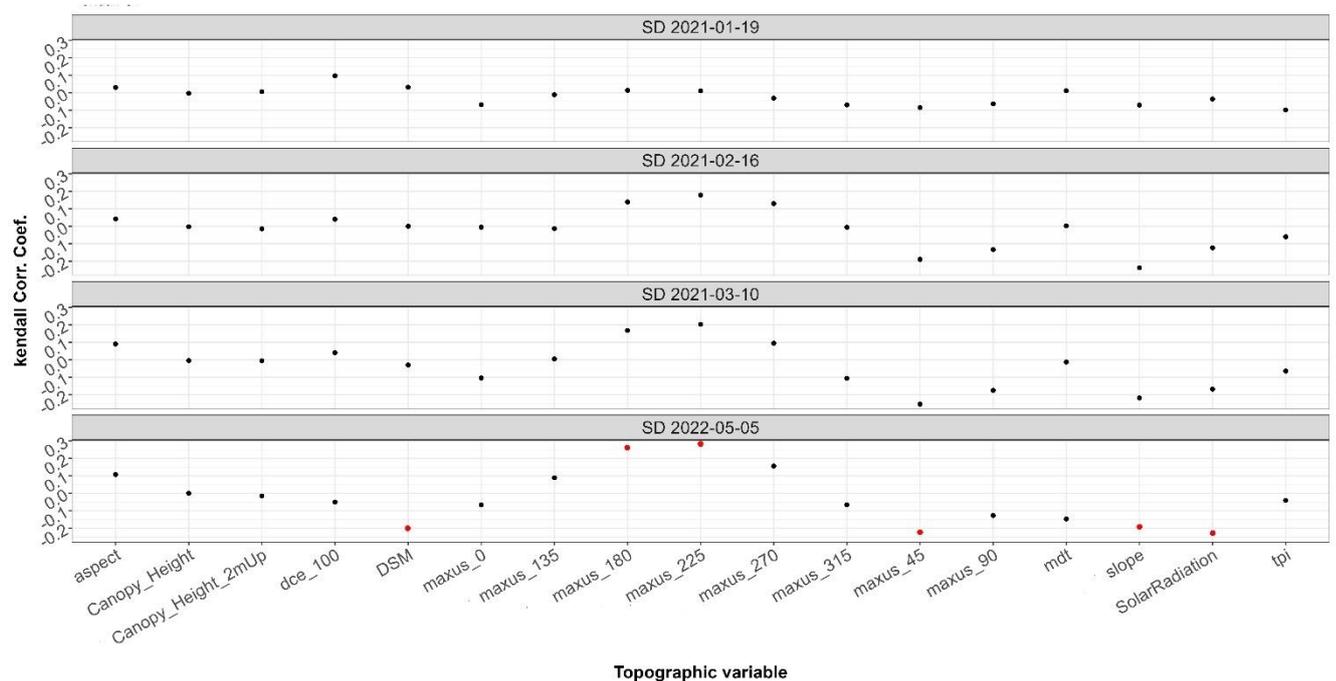


Figura 15. Correlaciones *Kendall* obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 2.2. de la ladera este incluyendo toda zona muestreada (*ALL*). Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% (*p value* <0.05).

4.3.2 categoría Open

Se muestran a continuación los resultados para la categoría *Open areas* en las tres zonas de ladera analizadas:

Ladera oeste sector 1.1

En este caso la variable DCE tuvo la correlación positiva más elevada (0,34) junto al *Canopy Height 2m Up* (0,34). La variable DCE fue estadísticamente significativa para todas las fechas al igual que la variable *Canopy Height 2m Up*, en la que solo no estuvo presente de manera significativa para el

5 de mayo de 2022. Esto demuestra que la zona *Open areas* de esta zona de la ladera, favorece mayores acumulaciones de nieve a mayor distancia al límite del dosel arbóreo y situadas a mayor altitud.

A su vez, las orientaciones sur (180°) y suroeste (225°) de la variable *Maxus-Sx*, presentaron correlaciones positivas (0,33) y estadísticamente significativas, mostrando que en esta ladera se acumularon mayores cantidades de nieve en zonas con *maxus-Sx* positivos, (barlovento del viento). Las variables *Solar Radiation* (0,24) y *Aspect* (-0,23) tuvieron correlaciones negativas significativas para el 10 de marzo de 2021 y el 5 de mayo de 2022 respectivamente (figura 16).

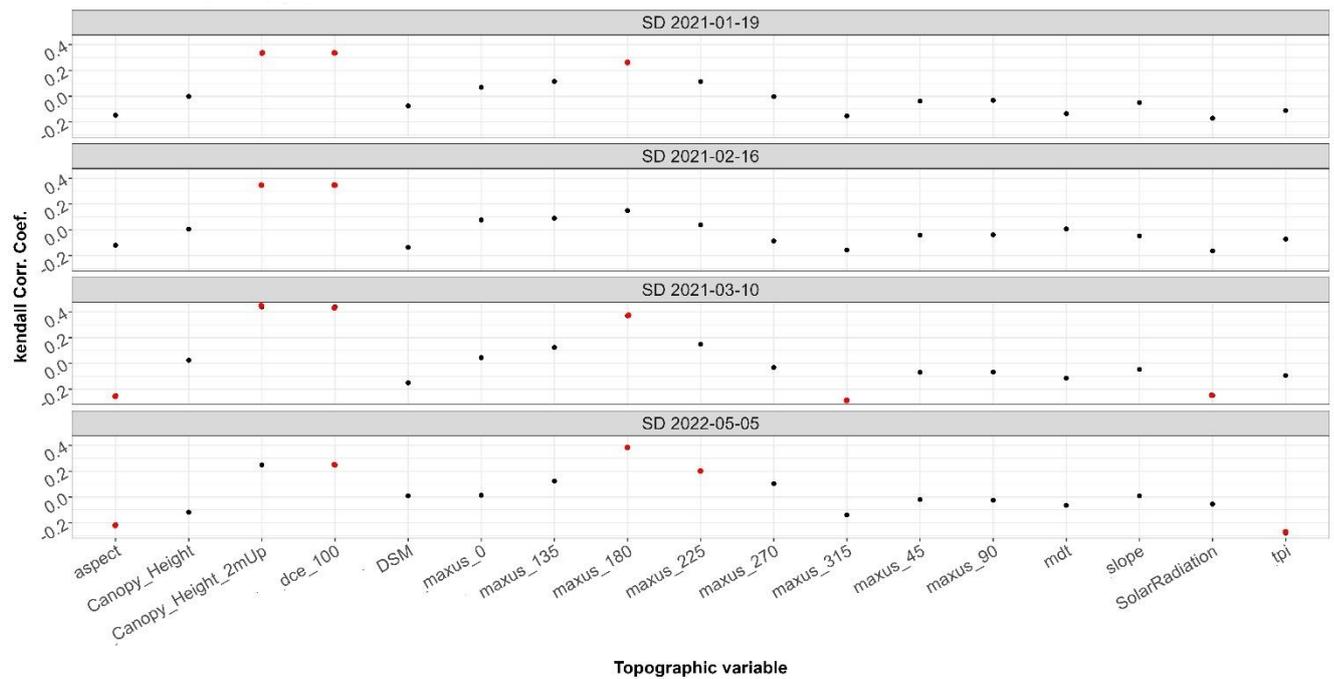


Figura 16. Correlaciones Kendall obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 1.1 de la ladera oeste en la categoría *Open areas*. Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% (p value <0.05).

Ladera oeste sector 1.2

La variable TPI estuvo en las cuatro fechas de medición con una correlación negativa promedio de -0,24, siendo todas ellas estadísticamente significativas. El *Canopy Height 2mUp* registro correlaciones altas a mediados y finales de la temporada con un promedio de 0,66, siendo el valor más alto de correlación de una variable en dos periodos de estudio en una misma categoría espacial. La orientación sureste (135°) de la variable *Maxus-Sx* tiene una correlación positiva con el espesor de nieve y negativa para *Maxus-Sx* de dirección norte (siendo estadísticamente significativa el 04 de mayo de 2022). La variable MDT presento dos correlaciones opuestas entre el 10 de marzo de 2021 y el 05 de mayo de 2022, pasando de ser negativa a positiva respectivamente. La profundidad de la nieve en el último periodo de medición tuvo una correlación positiva y estadísticamente significativa con la variable *Slope*, contradiciendo el patrón esperado y pudiendo estar motivado por movimientos rotaciones de masa como avalanchas o pequeños aludes que modificaron el patrón de distribución esperado (figura 17).

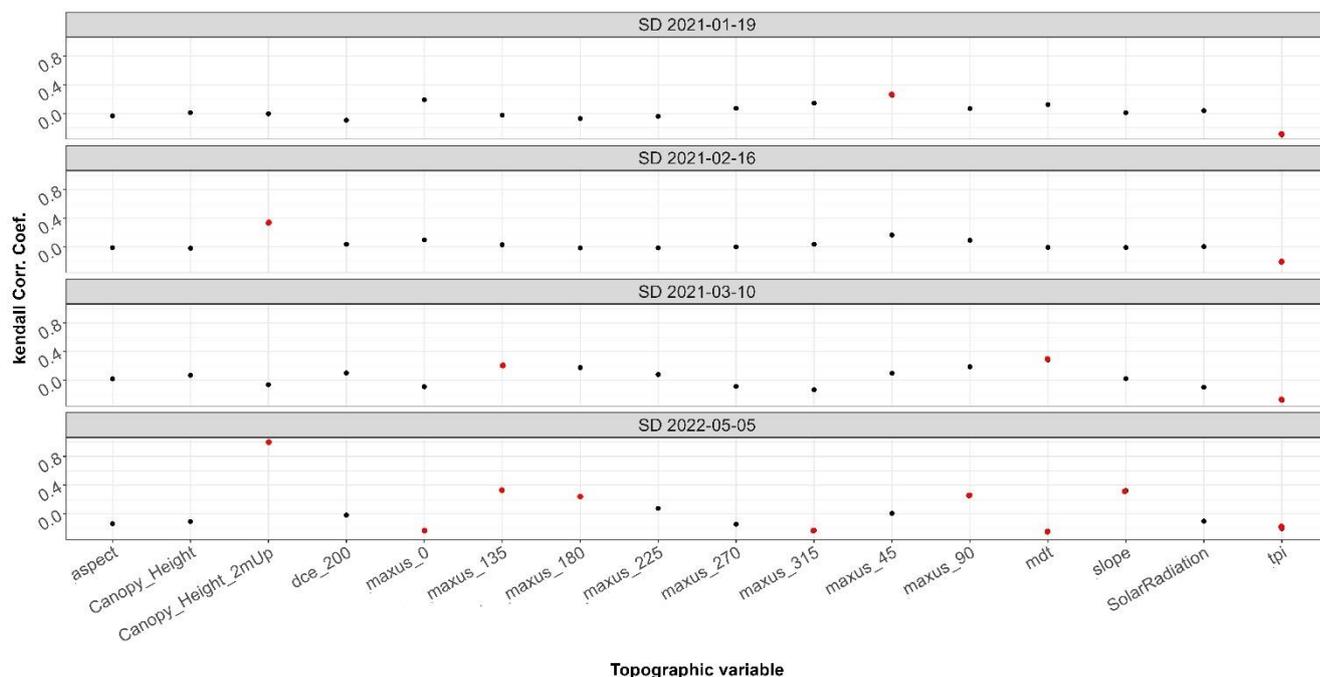


Figura 17. Correlaciones Kendall obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 1.2 de la ladera oeste en la categoría *Open areas*. Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% (p value <0.05).

Ladera este sector 2.2

La Profundidad de nieve no mostró correlaciones estadísticamente significativas con ninguna variable el 19 de enero de 2021. Sin embargo, en los otros tres días de observación se destaca la correlación negativa de la variable *Maxus-Sx* dirección noreste, con mayor acumulación en zonas apantalladas y orientadas al suroeste este soportado por las correlaciones positivas a 180°, 225° y 270°, siendo todas estadísticamente significativas. La variable *Solar Radiation* tiene una correlación negativa y tanto el MDT como el DSM (-0,21 en promedio), registraron correlaciones negativas y estadísticamente significativas al finalizar la temporada el 5 de mayo de 2022 (figura 18).

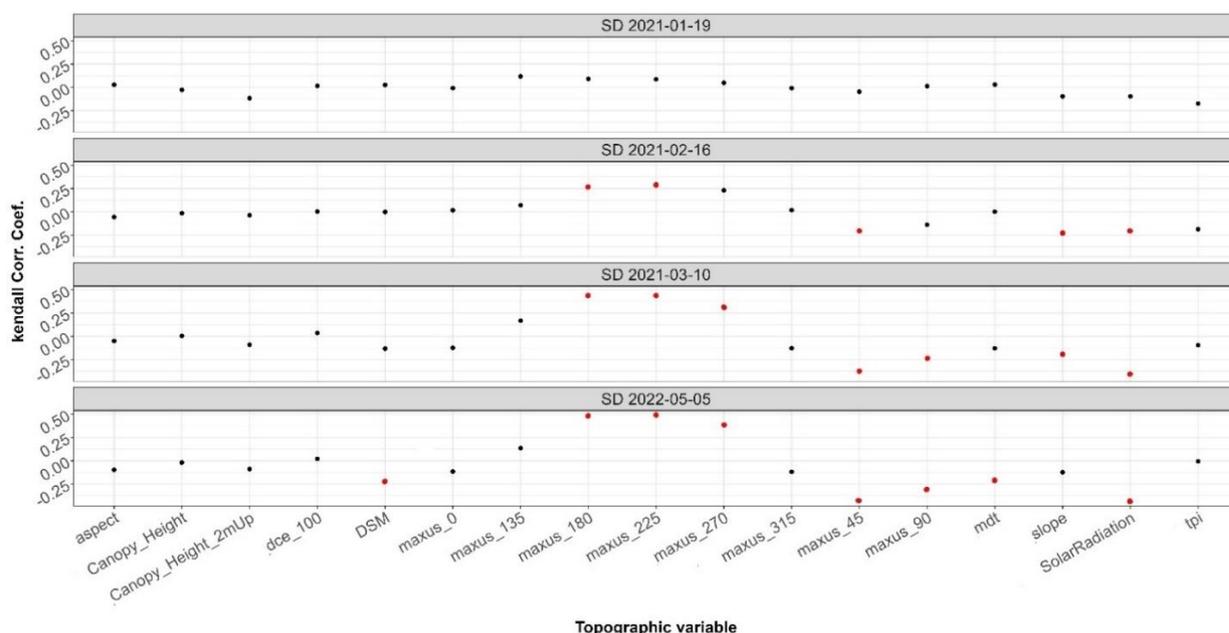


Figura 18. Correlaciones Kendall obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 2.2 de la ladera este en la categoría *Open areas*. Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% (p value <0.05).

4.3.3 Categoría *Large gaps*

Se muestran a continuación los resultados para la categoría *Large gaps* en las tres zonas de ladera analizadas:

Ladera oeste sector 1.1

La variable DSM presentó correlaciones positivas estadísticamente significativas con el espesor de nieve en las cuatro fechas de análisis con un valor promedio 0,29. Ello muestra una influencia de los elementos más altos de la superficie. En el periodo de seguimiento del 5 de mayo de 2022, la variable *Slope* presentó una correlación positiva reforzando la posible explicación expuesta para la misma fecha en la categoría *Open areas* del sector 1.2 (figura 19).

Se observan también correlaciones positivas y estadísticamente significativas para la variable *Maxus Sx* de dirección 225° el 10 de marzo de 2021 y 180° el 5 de mayo de 2022 (0,27).

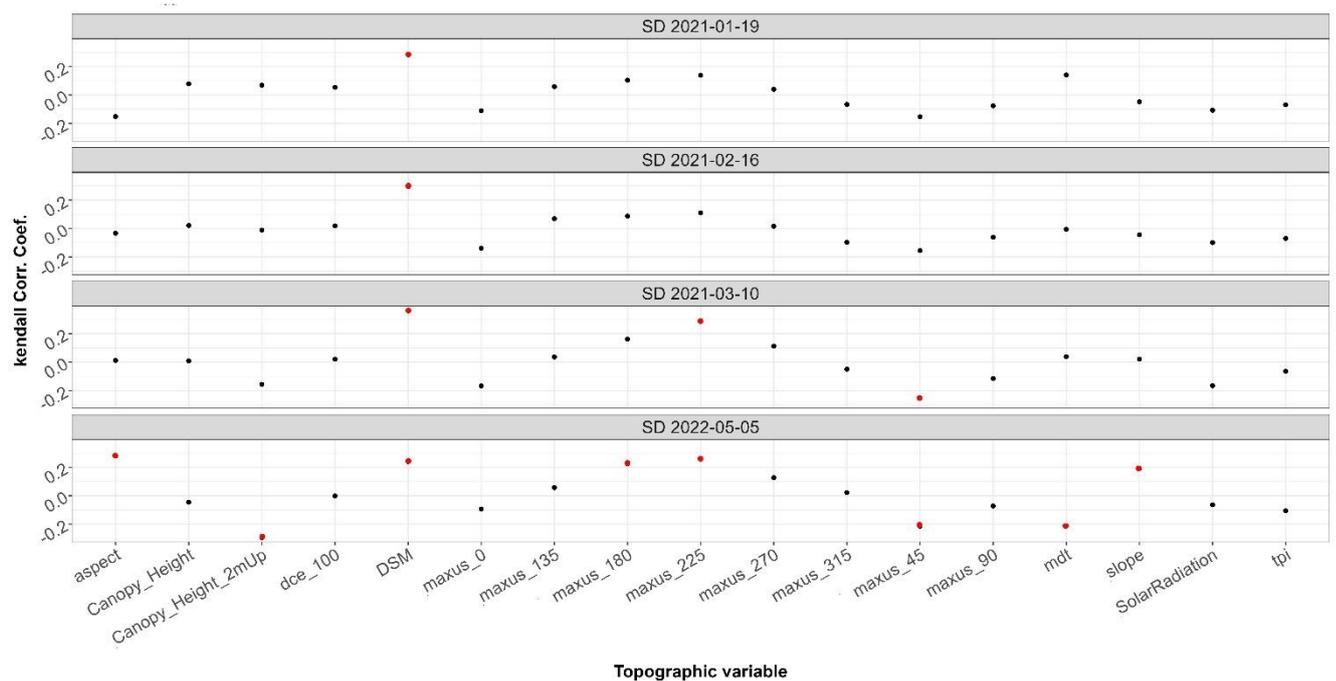


Figura 19. Correlaciones Kendall obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 1.1 de la ladera oeste en la categoría *Large gaps*. Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% (p value <0.05).

Ladera oeste sector 1.2

Este sector de la ladera tiene una correlación negativa significativa con la variable *Maxus-Sx* calculada para dirección noreste y positivas para dirección sureste (135°), siendo respectivamente significativas para el 10 de marzo de 2021 y el 5 de mayo de 2022. El *DCE* registra correlaciones altas con la

distribución del manto de nieve, siendo significativas estadísticamente al inicio y final de la temporada. No se registraron correlaciones con intervalos de confianza con ninguna variable en la segunda fecha de medición (figura 20).

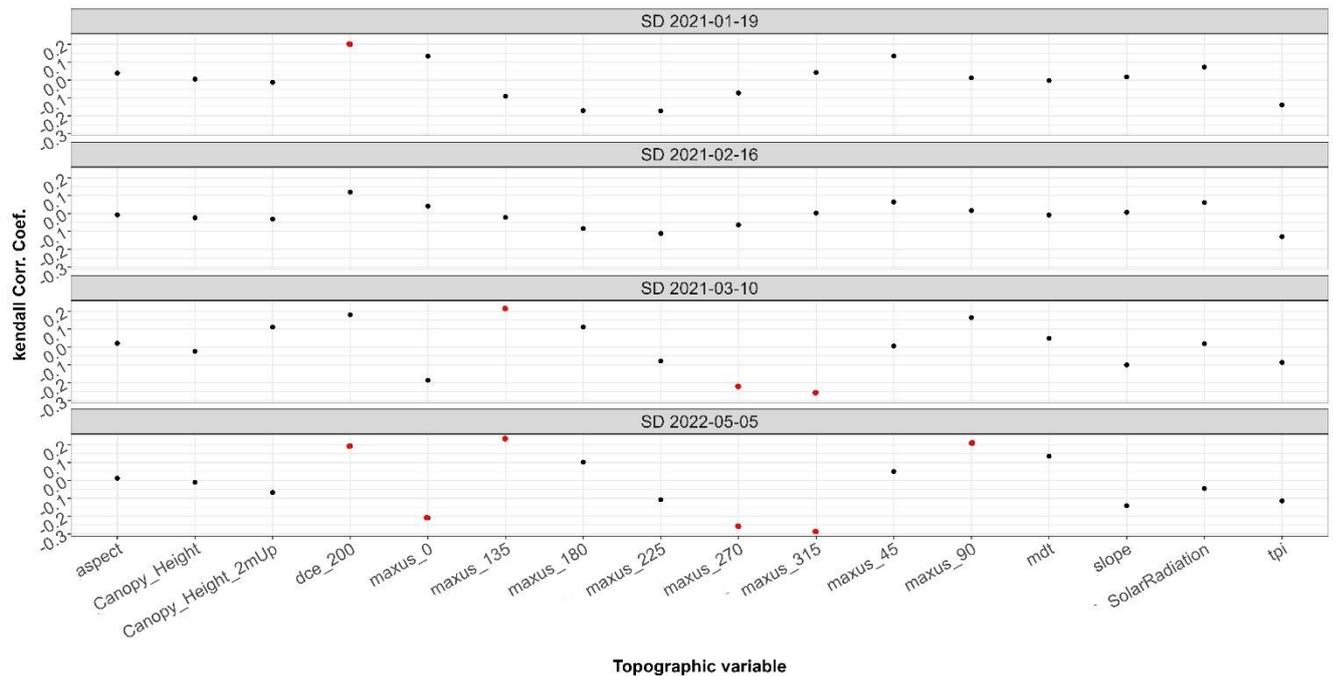


Figura 20. Correlaciones Kendall obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 1.2 de la ladera oeste en la categoría *Large gaps*. Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% (p value <0.05).

Ladera oeste sector 2.2

En este sector de la ladera hay una correlación positiva significativa entre los valores de espesor de nieve y las orientaciones *Maxus-Sx* del suroeste (0,27) en tres de las fechas de observación, siendo estadísticamente significativas. Por contraposición, la orientación de la variable *Maxus-Sx* opuesta (noroeste, 45°), presenta correlaciones estadísticamente negativas (-0,26).

La variable *Solar Radiation* tiene una correlación negativa estadísticamente significativa (-0,25) para los dos últimos periodos de medición junto a *Slope* y solo varían los valores de confianza en las fechas de obtención. De nuevo las variables *MDT* y el *MDS* tienen una correlación negativa estadísticamente significativa en el periodo de medición del 5 de mayo de 2022 (figura 21).

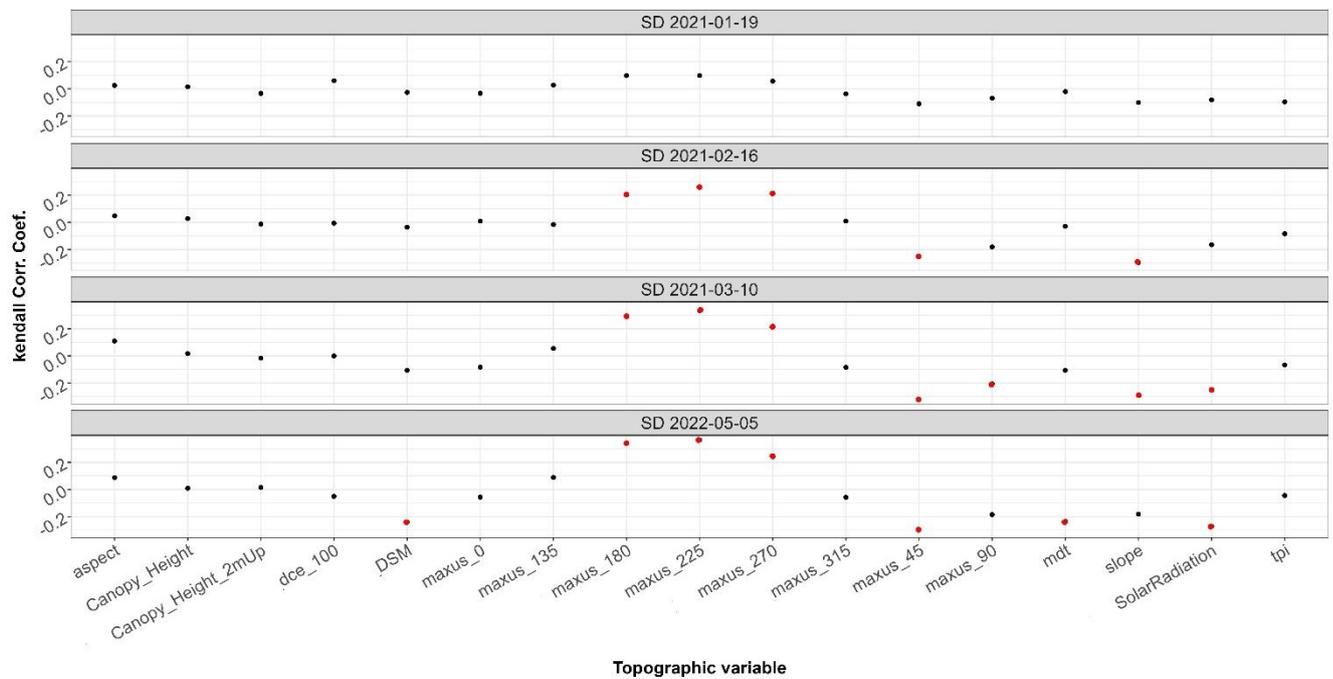


Figura 21. Correlaciones Kendall obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 2.2 de la ladera este en la categoría Large gaps. Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% ($p \text{ value} < 0.05$).

4.3.4 Categoría Small

Se muestran a continuación los resultados de manera global para la categoría *Small gaps* en las tres zonas de ladera analizadas:

La variable con una mayor cantidad de correlaciones y estadísticamente significativa de nuevo fue *Maxus Sx* con correlaciones positivas con el espesor de nieve en sectores orientados al suroeste y negativas en el noroeste. La variable DSM tuvo una correlación alta en el sector 1.1 del flanco oeste pero negativa en el flanco 2.2, siendo esta correlación similar entre el espesor de nieve y las variables MDT y *Slope*. No hubo correlaciones significativas en la primera fecha de análisis en ninguno de los flancos y tampoco en el sector 1.2 de la ladera oeste en todas las fechas de medición (Ver anexos 1, 2 y 3).

4.3.5 Categoría Edge

Al igual que en la categoría *Small*, El *Canopy Edge* presentó pocos valores de correlación con un intervalo de confianza en las dos laderas de estudio. Tan solo la variable MDS presentó valores estadísticamente significativos (inferiores a 0,05) el 19 de enero de 2021(0,18), con una correlación positiva en la ladera oeste sector 1.1 y a su vez una correlación negativa el 5 de mayo de 2022 (-0,18) (ver anexos 4, 5 y 6). Las demás correlaciones se asumen como poco significativas por lo que no son tenidas en cuenta en esta sección de análisis.

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. Aplicación de los VANT en el monitoreo del espesor de nieve en entornos forestales

Con este trabajo se pone en manifiesto la versatilidad de los VANT en el estudio de diferentes coberturas y procesos ambientales de la criósfera en zonas de montaña. La restitución fotogramétrica SfM de sus observaciones y su consecuente procesamiento geoespacial, permite la obtención de diversos productos para el análisis del manto nival, que por mucho tiempo fue considerado inviable debido al alto costo temporal de las adquisiciones y la difícil estandarización de los métodos de observación en zonas innivadas (Buhler et al., 2016). No obstante, hoy en día existe una gran número de aplicaciones y estudios que validan la determinación del espesor de nieve y la influencia de variables topográficas en el comportamiento espaciotemporal de la distribución de la nieve mediante el uso de VANTs (Bühler et al., 2016; Eberhard et al., 2021; Koutantou et al., 2021).

Estas técnicas de seguimiento con VANT han sufrido un rápido desarrollo técnico en los últimos años y esto ha permitido expandir la aplicabilidad en nuevos entornos, como las zonas forestales (Atkins et al., 2020; Borowik et al., 2013). En este sentido, además de las nubes de puntos tridimensionales y capas geoespaciales producto del proceso fotogramétrico SfM con la cámara RGB del *Ebee X*, se destaca la generación de índices de vegetación con una alta resolución espacial mediante el uso de una cámara multiespectral transportada en el multirrotor *DJI Matrice 300 RTK* VANTs, en el entorno prealpino del pirineo central. Tal y como se ha mostrado en este trabajo, se ha empleado con el fin de evaluar la viabilidad de los productos obtenidos del análisis de las nubes de puntos tridimensionales para delimitar el dosel forestal, exponiendo un alto grado de confianza en la consecuente delimitación y clasificación de zonas forestales.

De este modo se demuestra el potencial de los VANT para caracterizar la distribución espacial del dosel forestal con técnicas de SfM, siendo posible diferenciar el suelo y el dosel arbóreo de manera categórica para la generación de análisis geoespaciales relacionadas con el manto nival en zonas de bosques de montaña.

5.2. Definición metodológica para la obtención de capas geoespaciales

La obtención de la cobertura de suelo y dosel arbóreo mediante la nube de puntos tridimensionales usando las herramientas *CSF*, *SOR filter*, *Scalar Field* y *extract by value* en el programa *Cloud Compare*, mostró buenos resultados para el cálculo de espesores de nieve, como demuestra la correspondencia con los sondeos manuales, reportando un ajuste lineal alto ($R^2:0,93$). Pese a este buen resultado, es necesario remarcar que, en alguna de las zonas de muestreo, existieron diferencias no despreciables entre observaciones manuales y las del VANT. Las zonas con errores más elevados estaban localizadas muy próximas al dosel forestal, que posiblemente fueron afectadas por la ocurrencia de sombras en los puntos

extraídos de las capas geoespaciales de los espesores de nieve del VANT. No obstante, la aceptable fiabilidad de la observación del manto de nieve permitió generar los insumos para el cálculo de su espesor.

Por otra parte, la caracterización del dosel forestal permitió computar la altura media de los árboles de todas las zonas de estudio, que fue de 8 m en promedio. Al igual, fue posible determinar una clasificación de las zonas de estudio en función de la distancia al límite del dosel forestal (DCE), clasificado en *Open areas*, *Large gaps*, *Small gaps* y *Canopy Edge*. También se logró determinar el porcentaje de masa arbórea en cada una de las zonas en donde se reporta una presencia espacial reducida en las laderas de estudio seleccionadas, en las que ninguna de las zonas estudiadas supero el 15% de cobertura forestal respecto al total de área estudiada demostrándose la superioridad de las zonas abiertas y con vegetación inferior a 2 metros de altura.

La generación de Modelos Digitales de Elevación y Modelos Digitales de Superficie mediante restitución fotogramétrica SfM, permitieron determinar las características topográficas del terreno mediante diversas variables topográficas (Orientación, Pendiente, Radiación Solar Potencial, *Topographic Position Index* y *Máximum Up WindSlope parameter*). El computo de estas variables, fue motivado por su gran relevancia en el análisis de la distribución del espesor de nieve en zonas de montaña (Trujillo et al., 2007).

Pese a no disponer datos cuantitativos de radiación solar durante las adquisiciones de los VANT, se pudo comprobar el gran peso de la iluminación en la generación de productos SfM. De este modo, las nubes de puntos que representan tanto el dosel arbóreo como el suelo para el 16 de febrero de 2021 tuvieron la menor densidad de puntos. Ello se debe a la presencia de nubosidad alta durante los vuelos que afecto de manera notable el proceso de enlace de puntos comunes previo a la restitución fotogramétrica. No obstante, en el resto de los levantamientos con VANT, la determinación de productos geoespaciales se vio beneficiada por condiciones de luminosidad alta con la consecuente buena categorización de unidades, reforzando lo planteado en la bibliografía consultada (Revuelto, López-Moreno, et al., 2021, Revuelto et al., 2021).

En la definición del proceso metodológico para la obtención de capas, se exploraron inicialmente diferentes desarrollos para la clasificación de las nubes de puntos. Una de las herramientas valoradas fue el *plugin Canupo* implementado en el programa *Cloud Compare* (Brodu & Lague, 2012), que realiza una clasificación de una cobertura específica en la nube de puntos mediante un proceso iterativo de análisis por medio de un entrenamiento o selección de puntos multiescalar. En este caso la definición de parámetros fue altamente variable, presentando resultados con alta y baja correspondencia de manera indiferenciada, limitando la aplicación extensiva del proceso en las áreas de estudio definidas. Adicionalmente, se evaluó el comando del programa *Fusion* (Kraus y Pfeifer (1998), que clasifica una malla

superficial interpolada de la superficie eliminando las otras categorías. La superficie obtenida no contaba con la representatividad espacial esperada y no tenía en cuenta alta densidad de puntos iniciales. Dada la dificultad de aplicación de los dos métodos descritos y sus resultados poco fiables, ambas fueron descartadas en la determinación de protocolos en este trabajo.

A su vez, se utilizaron nubes de puntos tridimensionales provenientes de fuentes secundarias para realizar una validación visual en los dos flancos de estudio. Por una parte, se efectuó un levantamiento LiDAR con un Laser escáner terrestre (RIEGL LPM-321) el 4 de mayo de 2022, pero el producto derivado solo sirvió para verificar la concordancia espacial del área común con la zona frontal de la masa forestal proveniente de la nube de puntos por restitución fotogramétrica SfM. También se realizó la descarga del Modelo Digital de Superficies Vegetación- MDSnV2,5 obtenido de la primera cobertura LiDAR del territorio peninsular español realizado por Instituto Geográfico Nacional. Sin embargo, la resolución espacial de la capa (2,5m) no fue equiparable con los 0,5 de los insumos utilizados en este estudio por lo que sirvieron solo referente visual. Es por esto, que ninguna de las nubes de puntos LiDAR especificadas fueron empleadas para validaciones cuantitativas.

5.3 La distribución espacio temporal del espesor de nieve y su relación con la masa arbórea

Los resultados recogidos en este Trabajo Final de Máster muestran la gran relevancia del dosel forestal para explicar la variabilidad de espesor de nieve en zonas boscosas, pero al mismo tiempo evidencian que su distribución también depende de otras características del terreno y de los eventos meteorológicos a lo largo de la temporada de precipitación nival. De este modo, las variables topográficas y condiciones climáticas tienen, en algunos casos, un papel igual o superior a las características del dosel forestal en la distribución del manto de nieve. Como lo menciona (Boon, 2009), esta interacción no es lineal y el peso de las variables como aspecto y elevación cambian acorde a la magnitud de las precipitaciones dejando en evidencia la gran variabilidad espacio temporal de este proceso, destacándose las zonas forestales respecto a las zonas desprovistas de vegetación con mayores extensiones (Pfiser y Schneebeli, 1999).

La alta significancia estadística de las variables topográficas en este estudio no es diferente al observado en otras zonas innivadas del planeta. Estudios previos (Pomeroy, 1993), determinaron que la elevación tiene una correlación con la distribución de la nieve, cuando se analizan escalas amplias y regionales, pero sin evidenciar influencias significativas en áreas pequeñas como las analizadas en este estudio. La caracterización de las zonas por laderas corroboró que la exposición a la radiación solar potencial tiene un papel determinante en la distribución del manto nival, en combinación con la exposición de la ladera y su exposición al viento (Golding y Swanson, 1986). Este punto ha sido evidenciado con la dispersión en los valores de las correlaciones entre el manto de nieve y las variables topográficas analizadas en los diferentes días y zonas de estudio determinadas en este Trabajo final de máster. Pese a la citada variabilidad temporal entre las correlaciones de las variables topográficas y el manto de nieve obtenidas en

este trabajo, se observan ciertas relaciones destacables en la zona de estudio. En este sentido las correlaciones entre la variable *Maxus-Sd* y el espesor de nieve, evidencia que la masa arbórea funciona como una barrera protectora que altera el patrón de distribución espaciotemporal de la nieve en función de la dirección del viento. Esto es principalmente motivado por la presencia de la masa forestal que reduce la velocidad del viento, así como la magnitud del calor sensible y latente, haciendo que los paquetes de nieve se derritan más rápido (Woods et al., 2006). La falta de información meteorológica para interpretar y validar los procesos anteriormente descritos puede dejar en evidencia uno de los puntos que es necesario ahondar en investigaciones futuras. La inclusión de observaciones meteorológicas como la radiación solar incidente y reflejada, velocidad del viento, radiación de onda larga emitida por los árboles, de manera detallada, mejorara la explicación e interpretación de la variabilidad del espesor de nieve en zonas forestales (Varohola et al., 2010).

La importancia de las diferentes variables analizadas, tanto topográficas como las métricas del dosel forestal que fluctúa entre las diferentes fechas y zonas analizadas, da cuenta de cómo la distribución espacial del manto de nieve en zonas forestales está controlada por múltiples procesos. Con ello la segunda hipótesis planteada en este trabajo quedaría parcialmente validada, que establecía lo siguiente: “El dosel arbóreo juega un papel relevante en la dinámica de la distribución de la nieve teniendo mayor predominancia que variables topográficas como la altitud y la pendiente en zonas de estudio detalladas con relativo terreno estable”. En determinadas condiciones, el dosel forestal sí que tiene mayor relevancia, pero en otros momentos puede ganar peso de determinados eventos meteorológicos y/o de otras variables topográficas.

La categorización de la distribución espacial del bosque permitió también corroborar la tercera hipótesis planteada: las zonas más alejadas al límite de la masa arbórea corresponden a las que mayor profundidad de nieve promedio registran en las laderas analizadas. No obstante, esta puede estar sujeta a variaciones por combinación de procesos como lo menciona (Pomeroy et al., 2002), y como también se ha visto para alguna de las fechas observadas en el flanco (1.1) con valores superiores en zonas con menor tamaño de claro de bosque.

Por último, la baja fiabilidad del cálculo del espesor de nieve en la zona de sotobosque mediante el uso de fotogrametría es ampliamente reconocida (Lundquist et al., 2013). Sin embargo, en este trabajo se dan indicios de la potencial representatividad de la obtención de espesores bajo el dosel forestal con la cuantificación del espesor de nieve en la categoría *Canopy Edge*. Esto fue posible debido a la obtención de fotografías con diferente ángulo de orientación definidos en la cámara, la altura respecto al terreno y el traslape entre pares fotográficos. Los resultados dieron cuenta de la poca acumulación que hay en estas zonas debido a los múltiples procesos de flujos de energía y masa provocados por la presencia de los árboles, ratificando la hipótesis en el que la acumulación debajo del dosel forestal es menos que en

zonas abiertas en función del tamaño del claro. No obstante, este punto no ha sido evaluado con datos de campo con la medición de espesores bajo las copas de los árboles.

La información obtenida con los análisis realizados en esta pesquisa tiene una amplia gama de posibilidades de aplicación. La heterogeneidad del bosque y los cambios hidrológicos de la estructura del paisaje requieren de una mejora de la resolución espacial en modelos ecohidrológicos y climáticos que tengan en cuenta la evolución del manto nival en alta resolución, pudiendo llegar a discriminar procesos e interacciones entre la nieve y el bosque que son imperceptibles con escalas regionales, que modifican la magnitud y variabilidad de las proyecciones (Musselman, 2017). También tiene repercusiones en el manejo y gestión de áreas forestales, donde una manipulación modesta de la masa boscosa podría alterar el tiempo de descarga de la fusión de la nieve y su disposición espacial (Pfister and Schneebeli, 1999).

6. CONCLUSIONES

Este estudio presenta la primera aplicación al seguimiento de la variabilidad espaciotemporal del espesor de nieve en el ambiente forestal subalpino en un sector del pirineo central, mediante la restitución fotogramétrica SfM de productos derivados del uso de VANTs. Los resultados presentados manifiestan la pertinencia del uso de nubes de puntos tridimensionales para la obtención de espesores de nieve y métricas de la distribución espacial de la masa arbórea mediante el seguimiento de protocolos de procesamiento geoespacial, obteniendo capas de la superficie del suelo cubierto por nieve y la cobertura del dosel forestal en dos laderas de estudio con orientaciones este y oeste.

La viabilidad de estos productos presenta altos niveles de acuerdo, estimados mediante la comparación de espesores de nieve medidos en terreno y validaciones de concordancia estadística de la capa de dosel forestal con el computo del coeficiente Kappa, comparado con un índice de vegetación NDVI de alta resolución espacial.

La diferenciación del dosel arbóreo permitió generar métricas relativas a la altura media de las masas forestales y la distancia del límite del dosel a zonas abiertas y desprovistas de vegetación alta, con una consecuente clasificación espacial que puede ser reproducida sistemáticamente en otras zonas de estudio.

Las zonas abiertas de gran extensión o *open areas* presentaron el mayor promedio de espesor de nieve, seguidas por los *Claros amplios o Large gaps*, los *Claros pequeños o Small gaps* y el *Límite del dosel forestal o Canopy Edge*. Además, se constató que hay un mayor espesor de nieve promedio en los claros amplios o *Large gaps* que en el límite del dosel forestal o *Canopy Edge*. Este patrón se repite de manera menos notoria entre los claros amplios o *large gaps* y los claros pequeños o *small gaps*.

A su vez, se determina el alto potencial de la restitución fotogramétrica para la obtención de Modelos Digitales de Terreno y Modelos Digitales de Superficie de alta resolución espacial, que permiten la generación de un gran número de variables topográficas (Orientación, Pendiente, Radiación Solar Potencial, *Topographic Position Index* y *Máximo Up WindSlope parameter*).

El cálculo de correlaciones entre las variables topográficas y las métricas de la distribución espacial de la masa arbórea respecto a los espesores de nieve obtenidos en las dos laderas de seguimiento, evidenciaron la mayor significancia estadística con la exposición de las laderas al viento en función de las orientaciones analizadas con el parámetro *Máximo Up WindSlope parameter*. Esta fue precedida por las correlaciones con el Modelo Digital de Superficie, la Pendiente, el *Topographic Position Index* y la Radiación Solar Potencial.

Los resultados antes expuestos refuerzan la evidencia científica que apunta a que la distribución espacial de los árboles afecta la variabilidad de espesor de nieve en zonas boscosas, pero estadísticamente no es tan significativa como magnitud física única para explicarla. Las variables topográficas y condiciones climáticas tienen, en algunos casos, un papel igual o superior a las características del dosel forestal en la distribución espacio temporal del manto de nieve.

Los VANTs se presentan como sensores remotos de alta versatilidad y fácil implementación, con una alta aplicabilidad en estudios de la criósfera de zonas remotas de difícil acceso como lo son las zonas forestales prealpinas de las montañas pirenaicas.

8. BIBLIOGRAFÍA

Alonso-González, Esteban, Juan Ignacio López-Moreno, Francisco Navarro-Serrano, Alba Sanmiguel-Valladolid, Jesús Revuelto, Fernando Domínguez-Castro, and Antonio Ceballos. 2020. “Snow Climatology for the Mountains in the Iberian Peninsula Using Satellite Imagery and Simulations with Dynamically Downscaled Reanalysis Data.” *International Journal of Climatology* 40 (1): 477–91. <https://doi.org/10.1002/JOC.6223>.

Atkins, Jeff W, Atticus E L Stovall, and Xi Yang. 2020. “Mapping Temperate Forest Phenology Using Tower, UAV, and Ground-Based Sensors.” <https://doi.org/10.3390/drones4030056>.

Baltsavias, Emmanuel P. 1999. “A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning.” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (2–3): 83–94. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00014-3).

Barnett, T. P., J. C. Adam, and D. P. Lettenmaier. 2005. “Potential Impacts of a Warming Climate on Water Availability in Snow-Dominated Regions.” *Nature* 2005 438:7066 438 (7066): 303–9. <https://doi.org/10.1038/nature04141>.

Bebi, Peter, Dominik Kulakowski, and Christian Rixen. 2009. “Snow Avalanche Disturbances in Forest Ecosystems—State of Research and Implications for Management.” *Forest Ecology and Management* 257 (9): 1883–92. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2009.01.050>.

Boelman, Natalie T., Glen E. Liston, Eliezer Gurarie, Arjan J.H. Meddens, Peter J. Mahoney, Peter B. Kirchner, Gil Bohrer, et al. 2019. “Integrating Snow Science and Wildlife Ecology in Arctic-Boreal North America.” *Environmental Research Letters* 14 (1): 010401. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AAEEC1>.

Boon, Sarah. 2009. “Snow Ablation Energy Balance in a Dead Forest Stand.” *Hydrological Processes* 23 (18): 2600–2610. <https://doi.org/10.1002/HYP.7246>.

Borowik, Tomasz, Nathalie Pettorelli, Leif Sönnichsen, and Bogumiła Jędrzejewska. 2013. “Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) as a Predictor of Forage Availability for Ungulates in Forest and Field Habitats.” *European Journal of Wildlife Research* 59 (5): 675–82. <https://doi.org/10.1007/S10344-013-0720-0/TABLES/2>.

Brodu, Nicolas, and Dimitri Lague. 2012. “3D Terrestrial Lidar Data Classification of Complex Natural Scenes Using a Multi-Scale Dimensionality Criterion: Applications in Geomorphology.” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 68: 121–34. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006>.

Broxton, P. D., A. A. Harpold, J. A. Biederman, P. A. Troch, N. P. Molotch, and P. D. Brooks. 2015. "Quantifying the Effects of Vegetation Structure on Snow Accumulation and Ablation in Mixed-Conifer Forests." *Ecohydrology* 8 (6): 1073–94. <https://doi.org/10.1002/ECO.1565>.

Bühler, Y., M. Marty, L. Egli, J. Veitinger, T. Jonas, P. Thee, and C. Ginzler. 2015. "Snow Depth Mapping in High-Alpine Catchments Using Digital Photogrammetry." *Cryosphere* 9 (1): 229–43. <https://doi.org/10.5194/TC-9-229-2015>.

Buhler, Yves, Marc S. Adams, Ruedi Bosch, and Andreas Stoffel. 2016. "Mapping Snow Depth in Alpine Terrain with Unmanned Aerial Systems (UASs): Potential and Limitations." *Cryosphere* 10 (3): 1075–88. <https://doi.org/10.5194/TC-10-1075-2016>.

Buisan, Samuel T., Juan I. López-Moreno, Miguel Angel Saz, and John Kochendorfer. 2016. "Impact of Weather Type Variability on Winter Precipitation, Temperature and Annual Snowpack in the Spanish Pyrenees." *Climate Research* 69 (1): 79–92. <https://doi.org/10.3354/CR01391>.

Buisan, Samuel T, Miguel Angel Saz, and Juan I López-Moreno. 2014. "Spatial and Temporal Variability of Winter Snow and Precipitation Days in the Western and Central Spanish Pyrenees." *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY Int. J. Climatol* 0: 0–000. <https://doi.org/10.1002/joc.3978>.

Camarero, J. Julio, José María García-Ruiz, Gabriel Sangüesa-Barreda, Juan Diego Galván, Arben Q. Alla, Yasmina Sanjuán, Santiago Beguería, and Emilia Gutiérrez. 2018. "Recent and Intense Dynamics in a Formerly Static Pyrenean Treeline." <https://doi.org/10.1657/AAAR0015-001> 47 (4): 773–83. <https://doi.org/10.1657/AAAR0015-001>.

Camarero, J. Julio, Emilia Gutiérrez, and Marie Josée Fortin. 2000. "Spatial Pattern of Subalpine Forest-Alpine Grassland Ecotones in the Spanish Central Pyrenees." *Forest Ecology and Management* 134 (1–3): 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00241-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00241-8).

Camarero, J Julio, and Emilia Gutiérrez. 2004. "PACE AND PATTERN OF RECENT TREELINE DYNAMICS: RESPONSE OF ECOTONES TO CLIMATIC VARIABILITY IN THE SPANISH PYRENEES."

Chai, Chenhao, Lei Wang, Deliang Chen, Jing Zhou, Hu Liu, Jingtian Zhang, Yuanwei Wang, Tao Chen, and Ruishun Liu. 2022. "Future Snow Changes and Their Impact on the Upstream Runoff in Salween." *Hydrology and Earth System Sciences* 26 (18): 4657–83. <https://doi.org/10.5194/HESS-26-4657-2022>.

Chuvienco Salinero, Emilio. 2002. "Teledetección Ambiental: La Observación de La Tierra Desde El Espacio," 35–39. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=286798>.

Davis, R. E., J. P. Hardy, W. Ni, C. Woodcock, J. C. McKenzie, R. Jordan, and X. Li. 1997. "Variation of Snow Cover Ablation in the Boreal Forest: A Sensitivity Study on the Effects of Conifer Canopy." *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 102 (24): 29389–95. <https://doi.org/10.1029/97JD01335>.

Deems, Jeffrey S., Thomas H. Painter, and David C. Finnegan. 2013. "Lidar Measurement of Snow Depth: A Review." *Journal of Glaciology* 59 (215): 467–79. <https://doi.org/10.3189/2013JOG12J154>.

De la Riva, J. (2000). Caracterización climática del alto Valle de Tena. *Boletín Glaciológico Aragoné* 1, 81-109.

Donager, Jonathon, Temuulen Ts. Sankey, Andrew J. Sánchez Meador, Joel B. Sankey, and Abraham Springer. 2021. "Integrating Airborne and Mobile Lidar Data with UAV Photogrammetry for Rapid Assessment of Changing Forest Snow Depth and Cover." *Science of Remote Sensing* 4 (December): 100029. <https://doi.org/10.1016/J.SRS.2021.100029>.

Donald, J. R., E. D. Soulis, N. Kouwen, and A. Pietroniro. 1995. "A Land Cover-Based Snow Cover Representation for Distributed Hydrologic Models." *Water Resources Research* 31 (4): 995–1009. <https://doi.org/10.1029/94WR02973>.

Dong, Chunyu, and Lucas Menzel. 2017. "Snow Process Monitoring in Montane Forests with Time-Lapse Photography." *Hydrological Processes* 31 (16): 2872–86. <https://doi.org/10.1002/HYP.11229>.

Eberhard, Lucie A., Pascal Sirguey, Aubrey Miller, Mauro Marty, Konrad Schindler, Andreas Stoffel, and Yves Bühler. 2021. "Intercomparison of Photogrammetric Platforms for Spatially Continuous Snow Depth Mapping." *Cryosphere* 15 (1): 69–94. <https://doi.org/10.5194/TC-15-69-2021>.

Eker, Remzi, Yves Bühler, Sebastian Schlögl, Andreas Stoffel, and Abdurrahim Aydın. 2019. "Monitoring of Snow Cover Ablation Using Very High Spatial Resolution Remote Sensing Datasets." *Remote Sensing* 2019, Vol. 11, Page 699 11 (6): 699. <https://doi.org/10.3390/RS11060699>.

FAO. 2010. "FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS Rome."

Flanner, M. G., K. M. Shell, M. Barlage, D. K. Perovich, and M. A. Tschudi. 2011a. "Radiative Forcing and Albedo Feedback from the Northern Hemisphere Cryosphere between 1979 and 2008." *Nature Geoscience* 2011 4:3 4 (3): 151–55. <https://doi.org/10.1038/ngeo1062>.

Gascoin, S., O. Hagolle, M. Huc, L. Jarlan, J. F. Dejoux, C. Szczypta, R. Marti, and R. Sánchez. 2015. "A Snow Cover Climatology for the Pyrenees from MODIS Snow Products." *Hydrology and Earth System Sciences* 19 (5): 2337–51. <https://doi.org/10.5194/HESS-19-2337-2015>.

Gilaberte-Búrdalo, M., J. I. López-Moreno, E. Morán-Tejeda, S. Jerez, E. Alonso-González, F. López-Martín, and M. R. Pino-Otín. 2017. "Assessment of Ski Condition Reliability in the Spanish and Andorran Pyrenees for the Second Half of the 20th Century." *Applied Geography* 79 (February): 127–42. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2016.12.013>.

Goelles, Thomas, and Carl E. Boggild. 2017. "Albedo Reduction of Ice Caused by Dust and Black Carbon Accumulation: A Model Applied to the K-Transect, West Greenland." *Journal of Glaciology* 63 (242): 1063–76. <https://doi.org/10.1017/JOG.2017.74>.

Golding, Douglas L., and Robert H. Swanson. 1986. "Snow Distribution Patterns in Clearings and Adjacent Forest." *Water Resources Research* 22 (13): 1931–40. <https://doi.org/10.1029/WR022I013P01931>.

Haeberli, Wilfried, and Colin Whiteman. 2015. "Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters: A General Framework." *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*, January, 1–34. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394849-6.00001-9>.

Harder, Phillip, John W. Pomeroy, Warren D. Helgason, and Warren D. Helgason. 2020. "Improving Sub-Canopy Snow Depth Mapping with Unmanned Aerial Vehicles: Lidar versus Structure-from-Motion Techniques." *Cryosphere* 14 (6): 1919–35. <https://doi.org/10.5194/TC-14-1919-2020>.

Hedstrom, N R, and J W Pomeroy. n.d. "Measurements and Modelling of Snow Interception in the Boreal Forest." Accessed November 10, 2022. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199808/09\)12:10/11](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11).

Hendrick, Robert L., and Bruce D. Filgate. "Application of Environmental Analysis to Watershed Snowmelt." *Journal of Applied Meteorology* (1962-1982) 10, no. 3 (1971): 418–29. <http://www.jstor.org/stable/26175307>.

Hiemstra, Christopher A., Glen E. Liston, and William A. Reiners. 2006. "Observing, Modelling, and Validating Snow Redistribution by Wind in a Wyoming Upper Treeline Landscape." *Ecological Modelling* 197 (1–2): 35–51. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2006.03.005>.

Hodson, Andy, Aga Nowak, Marie Sabacka, Anne Jungblut, Francisco Navarro, David Pearce, María Luisa Ávila-Jiménez, Peter Convey, and Gonçalo Vieira. 2017. "Climatically Sensitive Transfer of Iron to Maritime Antarctic Ecosystems by Surface Runoff." *Nature Communications* 2017 8:1 8 (1): 1–7. <https://doi.org/10.1038/ncomms14499>.

López Moreno, I., Soubeyroux, J., Gascoin, S., Alonso-Gonzalez, E, Durán-Gomez, N., Lafaysse, M, Vernay, M Carmagnoa, C. y Morin. "Long-Term Trends (1958-2017) in Snow Cover Duration and Depth in the Pyrenees." *International Journal of Climatology* 40 (14). Accessed November 11, 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.6571i>.

James, Mike R., Stuart Robson, and Mark W. Smith. 2017. "3-D Uncertainty-Based Topographic Change Detection with Structure-from-Motion Photogrammetry: Precision Maps for Ground Control and Directly Georeferenced Surveys." *Earth Surface Processes and Landforms* 42 (12): 1769–88. <https://doi.org/10.1002/ESP.4125>.

Jonas, T, C Marty, J Magnusson, Magnus-Son@slf Ch, and (J Magnusson. 2009. "Estimating the Snow Water Equivalent from Snow Depth Measurements in the Swiss Alps." *Journal of Hydrology* 378: 161–67. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.021>.

Jones, H. G. (H. Gerald). 2001. "Snow Ecology : An Interdisciplinary Examination of Snow-Covered Ecosystems," 378.

Kim, Edward, Charles Gatebe, Dorothy Hall, Jerry Newlin, Amy Misakonis, Kelly Elder, Hans Peter Marshall, et al. 2017. "NASA's Snowex Campaign: Observing Seasonal Snow in a Forested Environment." *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2017-July (December)*: 1388–90. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8127222>.

Körner, Christian. 1998. "A Re-Assessment of High Elevation Treeline Positions and Their Explanation." *Oecologia* 115 (4): 445–59. <https://doi.org/10.1007/S004420050540>.

Koutantou, K., G. Mazzotti, and P. Brunner. 2021. "UAV-BASED LIDAR HIGH-RESOLUTION SNOW DEPTH MAPPING IN THE SWISS ALPS: COMPARING FLAT AND STEEP FORESTS." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B3-2021 (B3-2021)*: 477–84. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLIII-B3-2021-477-2021>.

Kubái, Martin, Adam Brziak, Anning Xu, Liang Emlyn Yang, Weibing Yang, Justin S Mankin, Daniel Viviroli, Deepti Singh, Arjen Y Hoekstra, and Noah S Diffenbaugh. 2015. "The Potential for Snow to Supply Human Water Demand in the Present and Future." *Environmental Research Letters* 10 (11): 114016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/114016>.

Lague, Dimitri, Nicolas Brodu, and Jérôme Leroux. 2013. "Accurate 3D Comparison of Complex Topography with Terrestrial Laser Scanner: Application to the Rangitikei Canyon (N-Z)." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82 (August): 10–26. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2013.04.009>.

Lendzioch, Theodora, Jakub Langhammer, and Michal Jenicek. 2019. "Estimating Snow Depth and Leaf Area Index Based on UAV Digital Photogrammetry." *Sensors* 2019, Vol. 19, Page 1027 19 (5): 1027. <https://doi.org/10.3390/S19051027>.

Li, Da Cheng, Jin Liang, Hao Hu, Zheng Zong Tang, Xiang Guo, and Lei Gang Li. 2014. "Strain Measurement for Sheet Metal Forming Based on Close Range Photogrammetry." *Applied Mechanics*

and Materials 475–476: 148–55. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.475-476.148>.

Lievens, Hans, Matthias Demuzere, Hans Peter Marshall, Rolf H. Reichle, Ludovic Brucker, Isis Brangers, Patricia de Rosnay, et al. 2019. “Snow Depth Variability in the Northern Hemisphere Mountains Observed from Space.” *Nature Communications* 2019 10:1 10 (1): 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12566-y>.

López-Moreno, J. I., and José M. García-Ruiz. 2009. “Influence of Snow Accumulation and Snowmelt on Streamflow in the Central Spanish Pyrenees / Influence de l’accumulation et de La Fonte de La Neige Sur Les Écoulements Dans Les Pyrénées Centrales Espagnoles.” <https://doi.org/10.1623/HYSJ.49.5.787.55135> 49 (5). <https://doi.org/10.1623/HYSJ.49.5.787.55135>.

López-Moreno, J. Ignacio, and J. Latron. 2008. “Influence of Canopy Density on Snow Distribution in a Temperate Mountain Range.” *Hydrological Processes* 22 (1): 117–26. <https://doi.org/10.1002/HYP.6572>.

López-Moreno, Juan Ignacio, and Sergio M. Vicente-Serrano. 2007. “Atmospheric Circulation Influence on the Interannual Variability of Snow Pack in the Spanish Pyrenees during the Second Half of the 20th Century.” *Hydrology Research* 38 (1): 33–44. <https://doi.org/10.2166/NH.2007.030>.

López Moreno, J. I., B. Alvera, J. Latron, and S. R. Fassnacht. 2010. “Installation and Use of a Snow Pillow to Monitor the Snowpack. Izas Experimental Basin (Central Pyrenees).” *Cuadernos de Investigación Geográfica* 36 (1): 73–85. <https://doi.org/10.18172/CIG.1228>.

Lundquist, Jessica D., Susan E. Dickerson-Lange, James A. Lutz, and Nicoleta C. Cristea. 2013. “Lower Forest Density Enhances Snow Retention in Regions with Warmer Winters: A Global Framework Developed from Plot-Scale Observations and Modeling.” *Water Resources Research* 49 (10): 6356–70. <https://doi.org/10.1002/WRCR.20504>.

Malhi, Yadvinder, Janet Franklin, Nathalie Seddon, Martin Solan, Monica G. Turner, Christopher B. Field, and Nancy Knowlton. 2020. “Climate Change and Ecosystems: Threats, Opportunities and Solutions.” *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 375 (1794). <https://doi.org/10.1098/RSTB.2019.0104>.

Mazzotti, Giulia, William Ryan Currier, Jeffrey S. Deems, Justin M. Pflug, Jessica D. Lundquist, and Tobias Jonas. 2019. “Revisiting Snow Cover Variability and Canopy Structure Within Forest Stands: Insights From Airborne Lidar Data.” *Water Resources Research* 55 (7): 6198–6216. <https://doi.org/10.1029/2019WR024898>.

Mcgaughey, Robert J. 2008. “FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization.”

Morán-Tejeda, Enrique, Juan Ignacio López-Moreno, and Alba Sanmiguel-Valladolid. 2017. "Changes in Climate, Snow and Water Resources in the Spanish Pyrenees: Observations and Projections in a Warming Climate." *Advances in Global Change Research* 62: 305–23. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55982-7_13/TABLES/2.

Musselman, K. N., Noah P. Keitholotch, N. Mar, and Steven A. Mgulis. 2017. "Snowmelt Response to Simulated Warming across a Large Elevation Gradient, Southern Sierra Nevada, California." *Cryosphere* 11 (6): 2847–66. <https://doi.org/10.5194/TC-11-2847-2017>.

Musselman, Keith N., Nans Addor, Julie A. Vano, and Noah P. Molotch. 2021. "Winter Melt Trends Portend Widespread Declines in Snow Water Resources." *Nature Climate Change* 2021 11:5 11 (5): 418–24. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01014-9>.

Ninot, J. M., E. Carrillo, X. Font, J. Carreras, A. Ferré, R. M. Masalles, I. Soriano, and J. Vigo. 2007. "Altitude Zonation in the Pyrenees. A Geobotanic Interpretation." *Phytocoenologia* 37 (3–4): 371–98. <https://doi.org/10.1127/0340-269X/2007/0037-0371>.

Nolin, Anne W. 2010. "Recent Advances in Remote Sensing of Seasonal Snow." *Journal of Glaciology* 56 (200): 1141–50. <https://doi.org/10.3189/002214311796406077>.

Organization of the United Nations, Agriculture. 2011. "Mountain Forests in a Changing World. Realizing Values, Addressing Challenges. Chapter 2 Sources of Freshwater." www.mountainpartnership.org.

Edmond, J. Camaero, J. De Luis, M., Vicente-Serrano, S. 2011. "Impacts of Drought at Different Time Scales on Forest Growth across a Wide Climatic Gradient in North-Eastern Spain." *Agricultural and Forest Meteorology* 151 (12): 1800–1811. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2011.07.018>.

PFISTER, R. AND SCHNEEBELI, M. (1999), Snow Accumulation on Boards of different Sizes And Shapes. *HYDROL. PROCESS.*, 13: 2345-

Pomeroy, J. W., and D. M. Gray. 1995. "Snowcover Accumulation, Relocation and Management. NHRI Report No. 7," xiii + 144.

Pomeroy, J W, and R L H Essery. n.d. "Turbulent fluxes during Blowing Snow: field Tests of Model Sublimation Predictions." Accessed November 10, 2022. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19991230\)13:18](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19991230)13:18).

Pomeroy, J W, and D M Gray. 1995. "Book Reviews Snowcover Accumulation , Relocation and Management In This Book , Two Canadian Snow Hydrologists Have Brought Together a Wealth of Practical Knowledge of the Snowcover Which Plays Such an Important Role in Their Environment . Their Aim Is To ," 422–23.

- Pomeroy, J W, and R A Schmidt. 1993. "The Use of Fractal Geometry in Modelling Intercepted Snow Accumulation and Sublimation."
- Pomeroy, John W., Donald M. Gray, and Phil Marsh. 2008. "Studies on Snow Redistribution by Wind and Forest, Snow-Covered Area Depletion, and Frozen Soil Infiltration in Northern and Western Canada." *Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies. The Mackenzie GEWEX Experience 2*: 81–96. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75136-6_5/COVER.
- Radford, Jacob T., Gary M. Lackmann, and Martin A. Baxter. 2019. "An Evaluation of Snowband Predictability in the High-Resolution Rapid Refresh." *Weather and Forecasting* 34 (5): 1477–94. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0089.1>.
- Reu, Jeroen De, Jean Bourgeois, Machteld Bats, Ann Zwertvaegher, Vanessa Gelorini, Philippe De Smedt, Wei Chu, et al. 2013. "Application of the Topographic Position Index to Heterogeneous Landscapes." *Geomorphology* 186: 39–49. https://www.academia.edu/2513633/Application_of_the_topographic_position_index_to_heterogeneous_landscapes.
- Revuelto, J., D. Gómez, E. Alonso-González, I. Vidaller, F. Rojas-Heredia, C. Deschamps-Berger, J. García-Jiménez, et al. 2022. "Intermediate Snowpack Melt-out Dates Guarantee the Highest Seasonal Grasslands Greening in the Pyrenees." *Scientific Reports* 2022 12:1 12 (1): 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22391-x>.
- Revuelto, J., J. I. López-Moreno, C. Azorin-Molina, and S. M. Vicente-Serrano. 2015. "Canopy Influence on Snow Depth Distribution in a Pine Stand Determined from Terrestrial Laser Data." *Water Resources Research* 51 (5): 3476–89. <https://doi.org/10.1002/2014WR016496>.
- Revuelto, Jesús, Esteban Alonso-Gonzalez, Ixeia Vidaller-Gayan, Emilien Lacroix, Eñaut Izagirre, Guillermo Rodríguez-López, and Juan Ignacio López-Moreno. 2021. "Intercomparison of UAV Platforms for Mapping Snow Depth Distribution in Complex Alpine Terrain." *Cold Regions Science and Technology* 190 (October): 103344. <https://doi.org/10.1016/J.COLDREGIONS.2021.103344>.
- Revuelto, Jesús, Juan Ignacio López-Moreno, and Esteban Alonso-González. 2021. "Light and Shadow in Mapping Alpine Snowpack With Unmanned Aerial Vehicles in the Absence of Ground Control Points." *Water Resources Research* 57 (6): e2020WR028980. <https://doi.org/10.1029/2020WR028980>.
- Revuelto, Jesús, Juan Ignacio López-Moreno, Cesar Azorin-Molina, Esteban Alonso-González, and Alba Sanmiguel-Valladolid. 2016. "Small-Scale Effect of Pine Stand Pruning on Snowpack Distribution in the Pyrenees Observed with a Terrestrial Laser Scanner." *Forests* 2016, Vol. 7, Page 166 7 (8): 166. <https://doi.org/10.3390/F7080166>.

Robinson, David A., and Allan Frei. 2000. "Seasonal Variability of Northern Hemisphere Snow Extent Using Visible Satellite Data." *Professional Geographer* 52 (2): 307–15. <https://doi.org/10.1111/0033-0124.00226>.

Rood, Stewart B., Jason Pan, Karen M. Gill, Carmen G. Franks, Glenda M. Samuelson, and Anita Shepherd. 2008. "Declining Summer Flows of Rocky Mountain Rivers: Changing Seasonal Hydrology and Probable Impacts on Floodplain Forests." *Journal of Hydrology* 349 (3–4): 397–410. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2007.11.012>.

Rothwell, Richard, Graham Hillman, and John W. Pomeroy. 2016. "Marmot Creek Experimental Watershed Study." <https://doi.org/10.5558/Tfc2016-010> 92 (1): 32–36. <https://doi.org/10.5558/TFC2016-010>.

Rouse, J. W., Jr., R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering. 1974. "Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS." NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., Vol. 1, Sect. A.

Royston, Patrick. 1992. "Approximating the Shapiro-Wilk W-Test for Non-Normality." *Statistics and Computing* 1992 2:3 2 (3): 117–19. <https://doi.org/10.1007/BF01891203>.

Sanmiguel-Vallelado, Alba, Juan I. López-Moreno, Enrique Morán-Tejeda, Esteban Alonso-González, Francisco M. Navarro-Serrano, Ibai Rico, and J. Julio Camarero. 2020. "Variable Effects of Forest Canopies on Snow Processes in a Valley of the Central Spanish Pyrenees." *Hydrological Processes* 34 (10): 2247–62. <https://doi.org/10.1002/HYP.13721>.

Sanmiguel-Vallelado, Alba, James McPhee, Paula Esmeralda Ojeda Carreño, Enrique Morán-Tejeda, J. Julio Camarero, and Juan Ignacio López-Moreno. 2022. "Sensitivity of Forest–Snow Interactions to Climate Forcing: Local Variability in a Pyrenean Valley." *Journal of Hydrology* 605 (February): 127311. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.127311>.

Serrano, Enrique. 2022. "The Existing Glaciers of the Iberian Peninsula: The Central Pyrenees." *Iberia, Land of Glaciers: How The Mountains Were Shaped By Glaciers*, January, 525–53. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00025-6>.

Steinbauer, Manuel J., Richard Field, John Arvid Grytnes, Panayiotis Trigas, Claudine Ah-Peng, Fabio Attorre, H. John B. Birks, et al. 2016. "Topography-Driven Isolation, Speciation and a Global Increase of Endemism with Elevation." *Global Ecology and Biogeography* 25 (9): 1097–1107. <https://doi.org/10.1111/GEB.12469>.

Steinbauer, Manuel J., John Arvid Grytnes, Gerald Jurasinski, Aino Kulonen, Jonathan Lenoir, Harald Pauli, Christian Rixen, et al. 2018. "Accelerated Increase in Plant Species Richness on Mountain Summits Is Linked to Warming." *Nature* 556 (7700): 231–34. <https://doi.org/10.1038/S41586-018-0005-6>.

- Szabo, Denes, and Martin Schneebeli. 2007. "Subsecond Sintering of Ice." *Applied Physics Letters* 90 (15): 151916. <https://doi.org/10.1063/1.2721391>.
- Thorn, Colin E. 1978. "THE GEOMORPHIC ROLE OF SNOW*." *Annals of the Association of American Geographers* 68 (3): 414–25. <https://doi.org/10.1111/J.1467-8306.1978.TB01205.X>.
- Thuiller, Wilfried, Sandra Lavorel, Miguel B. Araújo, Martin T. Sykes, and I. Colin Prentice. 2005. "Climate Change Threats to Plant Diversity in Europe." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102 (23): 8245–50. <https://doi.org/10.1073/PNAS.0409902102/ASSET/4EB374B9-253C-49D1-9FD3-936F910EF365/ASSETS/GRAPHIC/ZPQ0230584990005.JPEG>.
- Trujillo, Ernesto, Jorge A. Ramírez, and Kelly J. Elder. 2007. "Topographic, Meteorologic, and Canopy Controls on the Scaling Characteristics of the Spatial Distribution of Snow Depth Fields." *Water Resources Research* 43 (7). <https://doi.org/10.1029/2006WR005317>.
- Varhola, Andrés, Nicholas C. Coops, Younes Alila, and Markus Weiler. 2014. "Exploration of Remotely Sensed Forest Structure and Ultrasonic Range Sensor Metrics to Improve Empirical Snow Models." *Hydrological Processes* 28 (15): 4433–48. <https://doi.org/10.1002/HYP.9952>.
- Varhola, Andrés, Nicholas C Coops, Markus Weiler, and R Dan Moore. n.d. "Forest Canopy Effects on Snow Accumulation and Ablation: An Integrative Review of Empirical Results." *Journal of Hydrology* 392: 219–33. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.08.009>.
- Vicente-Serrano, Sergio M., Juan I. Lopez-Moreno, Santiago Beguería, Jorge Lorenzo-Lacruz, Arturo Sanchez-Lorenzo, José M. García-Ruiz, Cesar Azorin-Molina, et al. 2014. "Evidence of Increasing Drought Severity Caused by Temperature Rise in Southern Europe." *Environmental Research Letters* 9 (4): 044001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044001>.
- Viviroli, Daniel, Hans H. Dürr, Bruno Messerli, Michel Meybeck, and Rolf Weingartner. 2007. "Mountains of the World, Water Towers for Humanity: Typology, Mapping, and Global Significance." *Water Resources Research* 43 (7): 7447. <https://doi.org/10.1029/2006WR005653>.
- Westoby, M. J., J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey, and J. M. Reynolds. 2012. "'Structure-from-Motion' Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool for Geoscience Applications." *Geomorphology* 179 (December): 300–314. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2012.08.021>.
- Winstral, Adam, and Danny Marks. 2002. "Simulating Wind Fields and Snow Redistribution Using Terrain-Based Parameters to Model Snow Accumulation and Melt over a Semi-Arid Mountain Catchment." *Hydrological Processes* 16 (18): 3585–3603. <https://doi.org/10.1002/HYP.1238>.

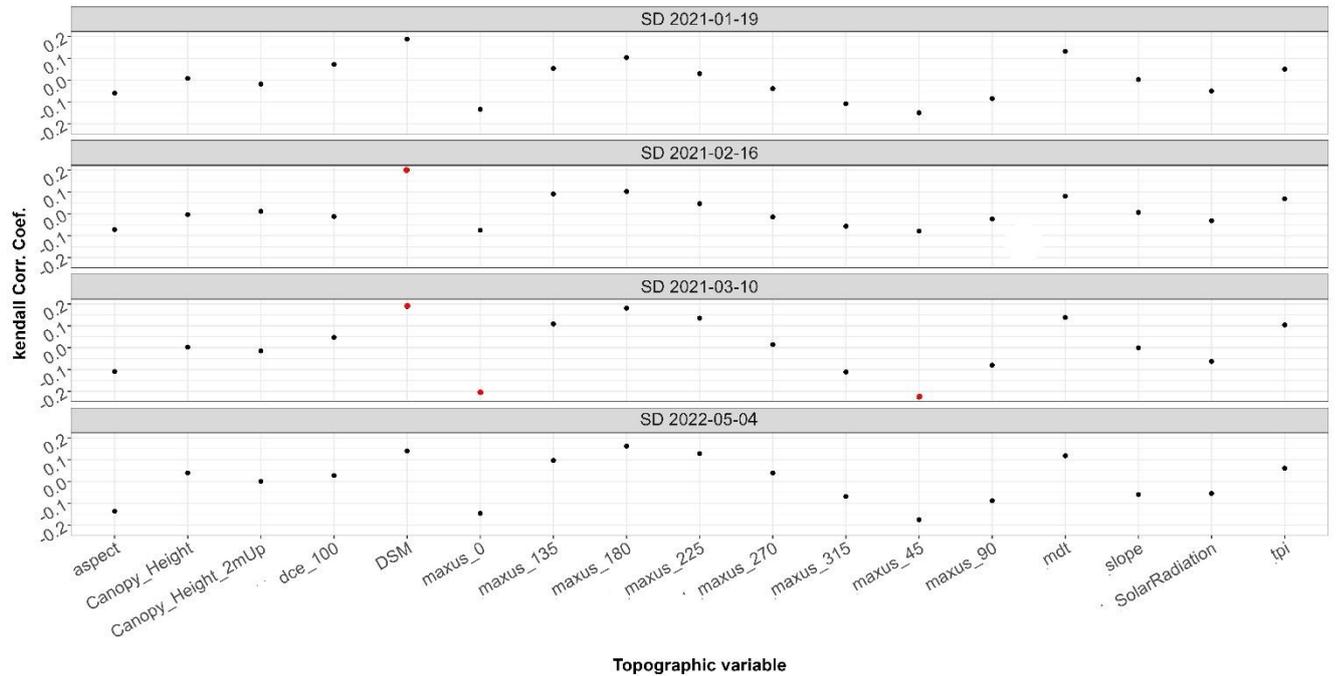
Winstral, Adam, Danny Marks, and Robert Gurney. 2013. "Simulating Wind-Affected Snow Accumulations at Catchment to Basin Scales." *Advances in Water Resources* 55 (May): 64–79. <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2012.08.011>.

Woods, Scott W., Robert Ahl, Jason Sappington, and Ward McCaughey. 2006. "Snow Accumulation in Thinned Lodgepole Pine Stands, Montana, USA." *Forest Ecology and Management* 235 (1–3): 202–11. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2006.08.013>.

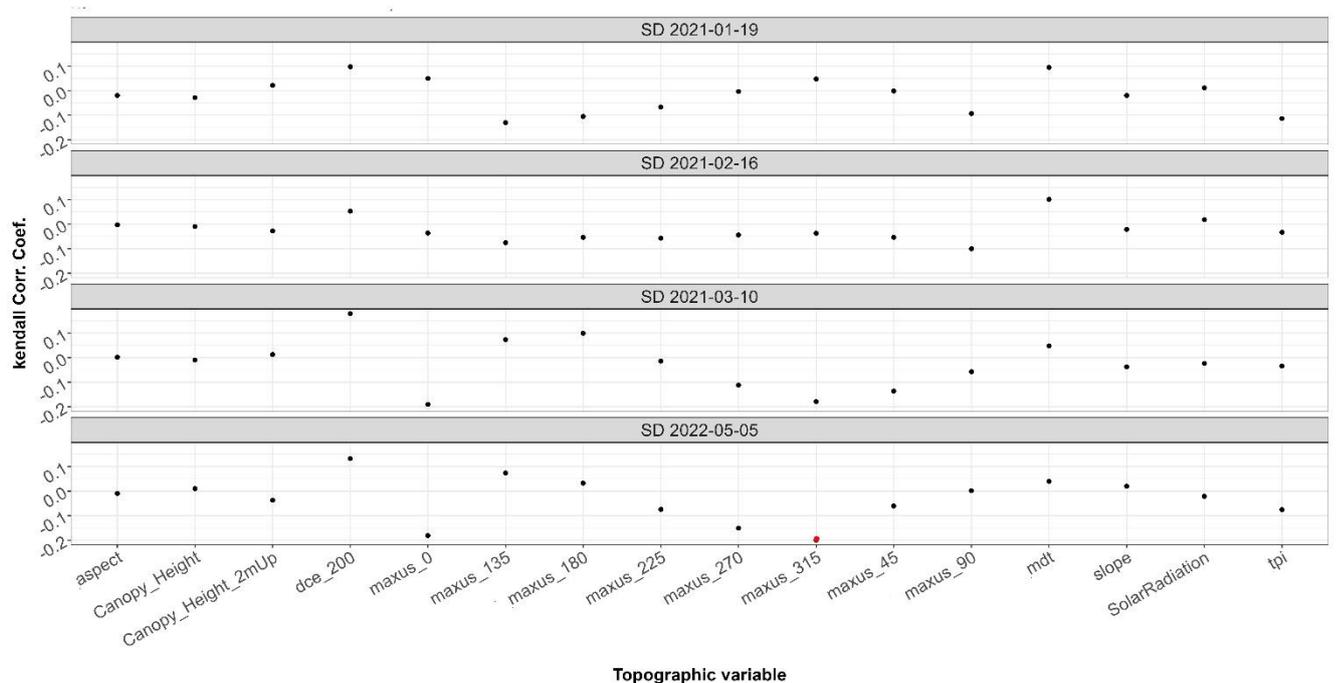
Zangiabadi, Somaye, Ali Ahmadimoghadam, and Farzin Naseri. 2011. "Forest Classification Using IRS Satellite Data." *World Applied Sciences Journal* 15 (10): 1409–13.

Zhang, Wuming, Jianbo Qi, Peng Wan, Hongtao Wang, Donghui Xie, Xiaoyan Wang, and Guangjian Yan. 2016. "An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation." *Remote Sensing* 2016, Vol. 8, Page 501 8 (6): 501. <https://doi.org/10.3390/RS8060501>.

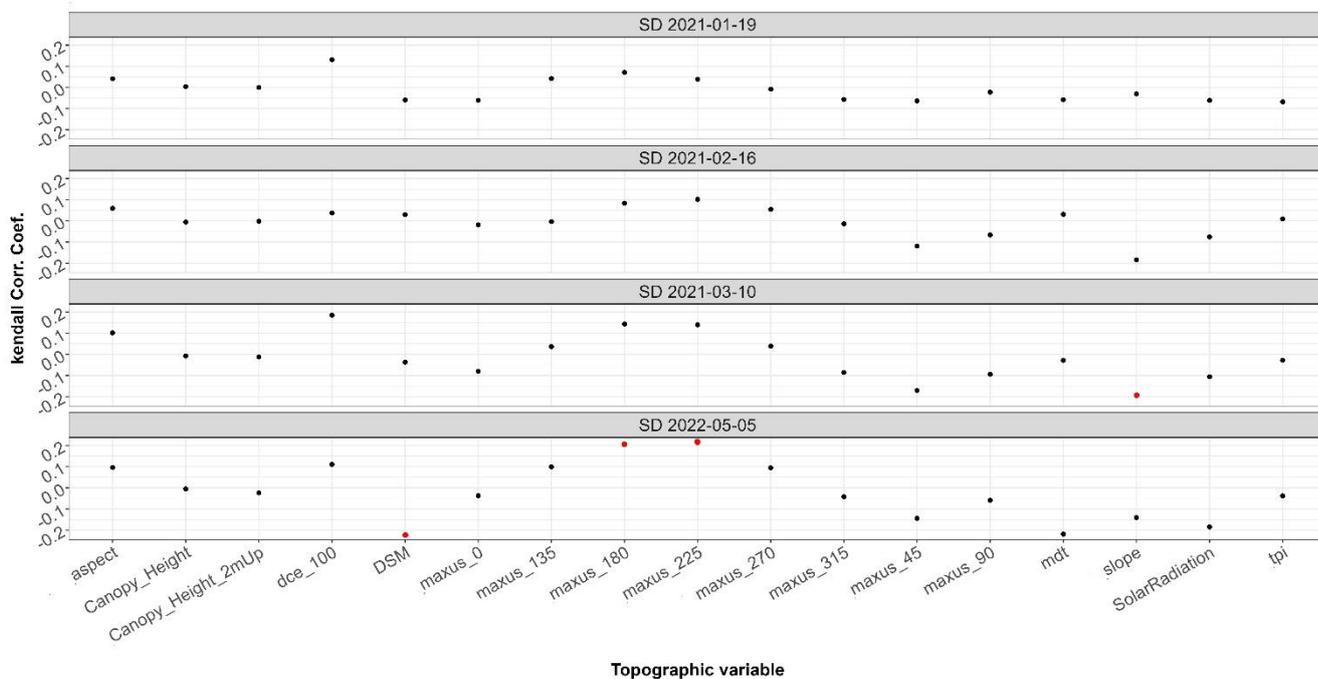
9. ANEXOS



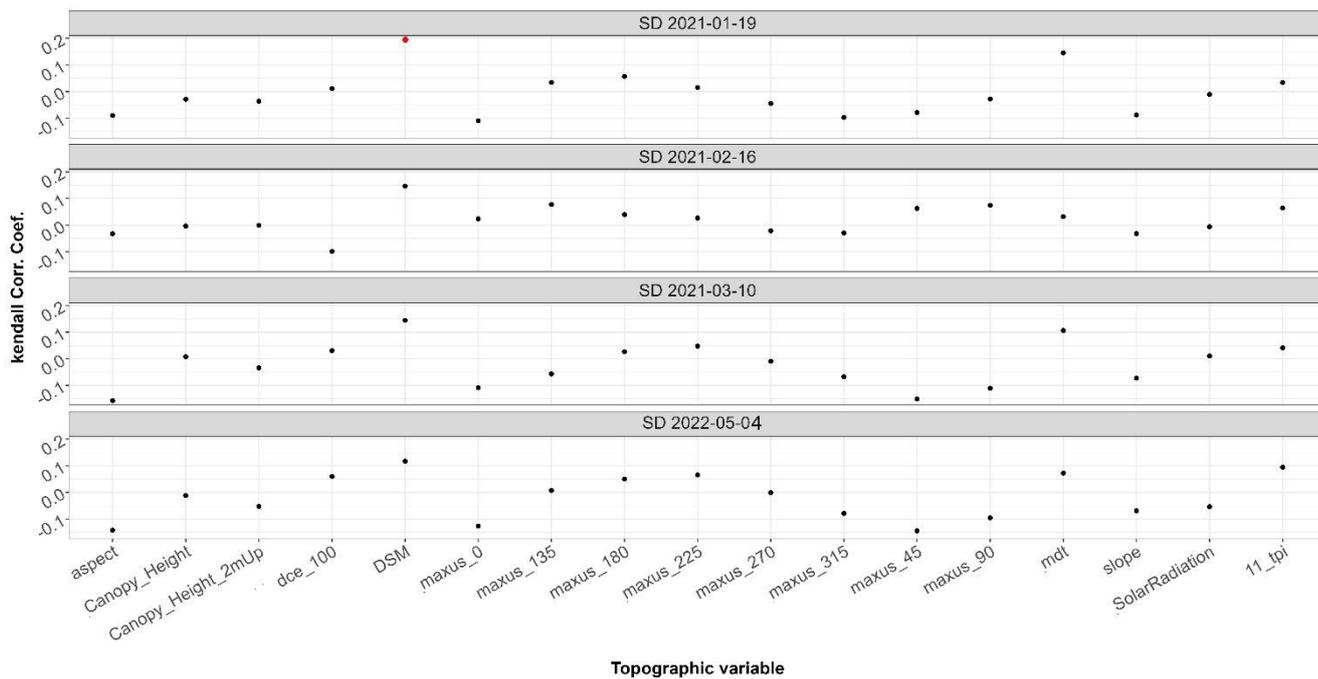
Anexo 1. Correlaciones Kendall obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 1.1 de la ladera oeste en la categoría *Small gaps*. Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% ($p\text{ value} < 0.05$).



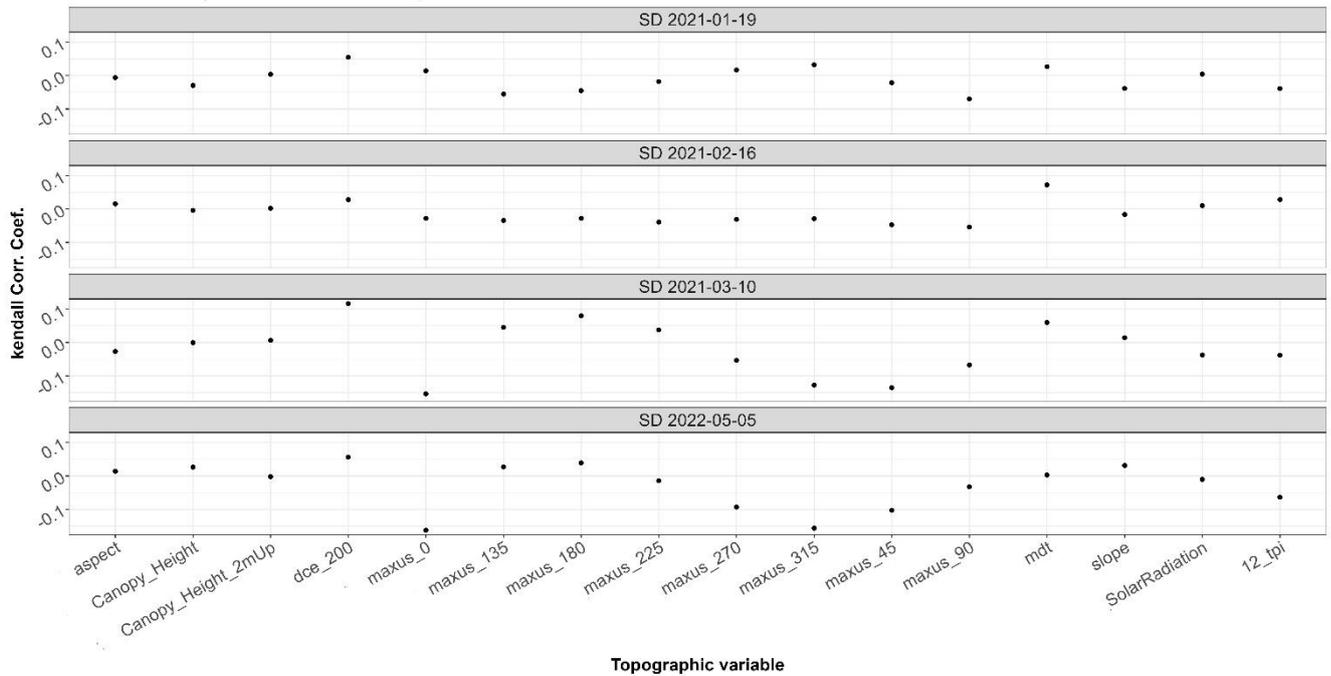
Anexo 2. Correlaciones Kendall obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 1.2 de la ladera oeste en la categoría *Small gaps*. Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% ($p\text{ value} < 0.05$).



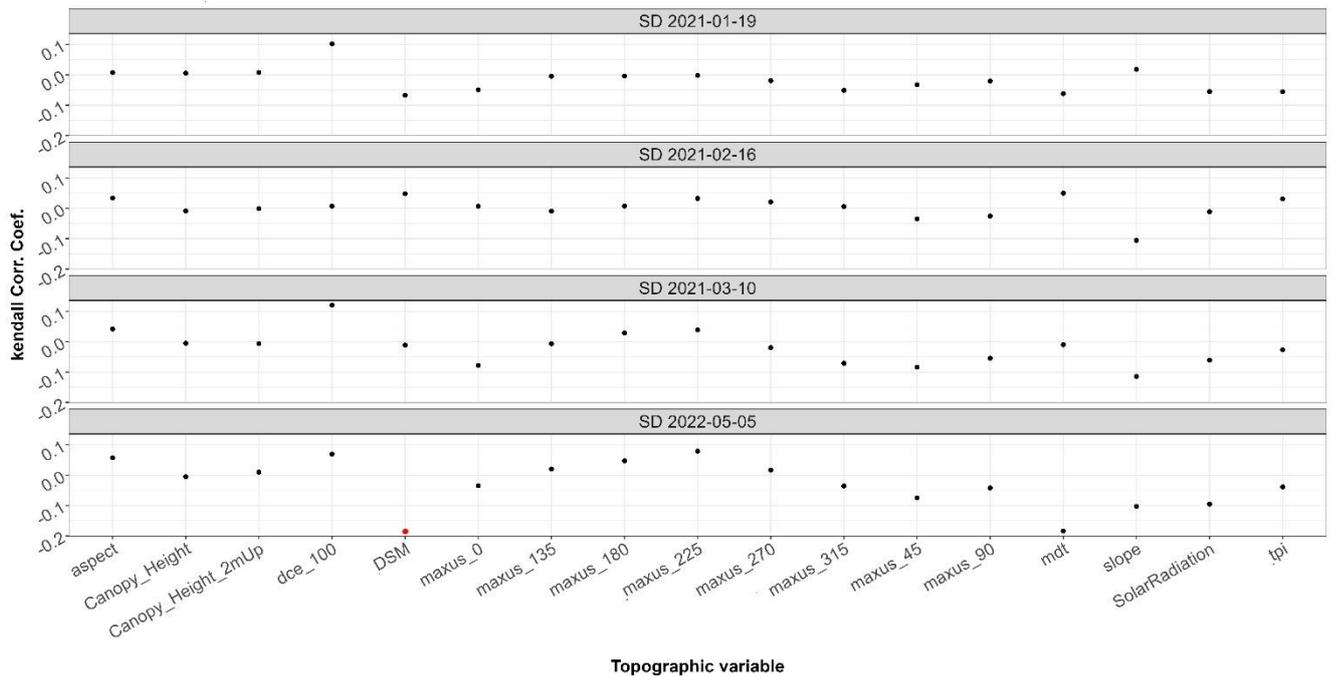
Anexo 3. Correlaciones Kendall obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 2.2 de la ladera este en la categoría *Small gaps*. Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% (p value <0.05).



Anexo 4. Correlaciones Kendall obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 1.1 de la ladera oeste en la categoría *Canopy edge*. Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% (p value <0.05).



Anexo 5. Correlaciones Kendall obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 1.2 de la ladera oeste en la categoría *Canopy edge*. Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% ($p\text{ value} < 0.05$).



Anexo 6. Correlaciones Kendall obtenidas entre el espesor de nieve y las variables topográficas y descriptivas del dosel forestal para el sector 2.2 de la ladera oeste en la categoría *Canopy edge*. Los puntos en rojo muestran aquellas correlaciones significativas con un intervalo de confianza del 95% ($p\text{ value} < 0.05$).