



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Aplicación de dispositivos UAV para el estudio del
manto nival en entornos de alta montaña:
El papel de la iluminación en la calidad de los
productos finales

Autor:

Guillermo Rodríguez López

Directores:

Jesús Revuelto Benedí
Juan de la Riva Fernández

Dpto. Geografía y Ordenación del Territorio / Facultad de Filosofía y Letras
Junio de 2019

Resumen

La fotogrametría sobre UAVs es una de las metodologías que más desarrollo ha tenido para el estudio de la criosfera en la última década, debido a su buena resolución temporal y autonomía. En este trabajo se ha puesto a prueba la aplicabilidad de este método en un entorno de alta montaña del Pirineo aragonés (cuenca de Izas) bajo diferentes condiciones de iluminación, con el fin de comprobar cuál es el papel que dichas condiciones desempeñan en la calidad de los productos finales. Para ello se han realizado 5 vuelos con un dispositivo UAV de ala fija a distintas horas del día, con diferentes ángulos de incidencia solar, propiciando la aparición de sombras topográficas y distintas condiciones de iluminación en el área de estudio. Para cuantificar la precisión de esta metodología se han comparado las nubes de puntos de los vuelos con una nube de puntos generada de manera el mismo día con láser escáner terrestre, método validado en el área de estudio. Los resultados muestran que para los vuelos con buenas condiciones de iluminación el error medio es $-0,01\text{m}$ y el error absoluto $0,07\text{m}$. Los resultados confirman el potencial de esta metodología para el estudio del manto nival a escala detalle. Sin embargo, en condiciones de iluminación malas encontramos ausencia de datos y niveles de error sustancialmente más elevados. A modo de ejemplo de aplicación se genera un mapa de espesor de nieve en el área de estudio a partir de la nube de puntos del mejor vuelo del UAV y la nube de puntos del vuelo LiDAR PNOA del Instituto geográfico nacional. A partir de los valores de espesor del manto nival obtenidos, se ha puesto en relación la distribución del manto nival en la cuenca con las principales variables topográficas: Altitud, pendiente, curvatura, TPI y radiación potencial.

Palabras clave: UAV, manto nival, iluminación, láser escáner terrestre, variables topográficas.

Abstract

Photogrammetry on UAVs is one of the most developed methodologies for the study of the cryosphere in the last decade due to its good spatial resolution and autonomy. In this work we have tested the applicability of this method in a high mountain catchment of the Aragonese Pyrenees (Izas basin) under different lighting conditions, in order to verify what is the role it plays in the quality of the final products. For this purpose, 5 flights were carried out with a fixed-wing UAV device at different times of the day, with different angles of solar incidence,

favoring the appearance of topographic shadows and different lighting conditions in the study area. To quantify the accuracy of this methodology, the point clouds of the flights were compared with a point cloud generated in the same day with the terrestrial laser scanner, a method validated in the study area. The results show that for flights with good lighting conditions the mean error is - 0.01m and the absolute error 0.07m. The results confirm the potential of this methodology for the study of the snow mantle at a detailed scale. However, under bad lighting conditions we find absence of data and substantially higher error levels. As an example of application, a snow depth map is made in the study area from the point cloud of the best flight of the UAV and the point cloud of the LiDAR flight PNOA of the National Geographic Institute. From the obtained values of snow depth, the distribution of the nival mantle in the basin has been related to the main topographical variables: Altitude, slope, curvature, TPI and potential radiation.

Key words: Unmanned aerial vehicle, snow cover, lightning, terrestrial laser scanner, topographic variables.

Índice de contenidos

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	6
4. METODOLOGÍA.....	8
4.1. Dispositivo UAV.....	8
4.2. Vuelos: Planificación y adquisición de datos.....	9
4.2.1. Planificación de la misión.....	9
4.2.2. Diseño del vuelo	11
4.2.3. Adquisición de datos en el terreno.....	11
4.2.4. Campaña de láser escáner terrestre.....	13
4.3. Postproceso y tratamiento de la información.....	14
4.3.1. Georreferenciación	14
4.3.2. Generación de nubes de puntos y MDS.....	15
4.3.3. Comparación con láser escáner y generación de mapas de nieve.....	17
4.3.4. Correlación entre la acumulación de nieve y las principales variables topográficas.....	18
5. RESULTADOS	19
5.1. Comparación con láser escáner	19
5.2. Modelos de espesor de nieve.....	23
5.3. Distribución espacial de la nieve en relación con la topografía.....	24
6. DISCUSIÓN.....	26
7. CONCLUSIÓN	29
8. BIBLIOGRAFÍA.....	30

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.....	6
Figura 2. Mapa de altitud de la cuenca de izas	7
Figura 3. Fotos oblicuas del área de estudio	8
Figura 4. Dispositivo UAV eBee plus	9
Figura 5. Solape de las imágenes en el área de estudio.....	10
Figura 6. Plan de vuelo del UAV en eMotion 3.7	12
Figura 7. Número de puntos comunes encontrados por SFM	17
Figura 8. Diferencias de precisión de los vuelos respecto a TLS.....	22
Figura 9. Error respecto a TLS en zonas iluminadas y de sombra	22
Figura 10. Modelo de espesor de nieve	23
Figura 11. Comparación de mapas de nieve de UAV y TLS	24
Figura 12. Relación entre el espesor de nieve y el TPI	25
Figura 13. Relación entre el espesor de nieve y la orientación de ladera.....	26

Índice de tablas

Tabla 1. Caracterización de los vuelos	13
Tabla 2. N° de fotos georreferenciadas con cada método.....	15
Tabla 3. Comparación de precisión de los vuelos respecto a TLS	20
Tabla 4. Valores de correlación manto nival - topografía	25
Tabla 5. Espesor del manto nival desde 2012	28
Tabla 6. Debilidades y fortalezas de los UAV como metodología	30

1. INTRODUCCIÓN

La gran influencia de la nieve y sus procesos relacionados en diferentes ámbitos provoca que haya sido objeto de estudio de las ciencias de la tierra desde antaño. El conocimiento y caracterización de los procesos de acumulación y fusión de nieve es esencial para una correcta gestión de los recursos hídricos. Así pues, un aprovechamiento eficiente de los embalses y reservas de agua, tanto para el consumo de la población y el uso agrícola como para la producción eléctrica, pasa por el conocimiento de la cantidad de nieve acumulada y, en consecuencia, de su potencial como fuente de agua de fusión (Fernandes *et al.* 2018). Además, determinar la cantidad de agua acumulada en forma de nieve combinada con la estimación del ritmo de fusión permite la prevención de riesgos asociados al proceso de fusión en la época de deshielo (Harder *et al.* 2016), como las inundaciones, las avalanchas de nieve o los movimientos en masa subsecuentes a la acción de la escorrentía en laderas de pendientes fuertes y litologías favorables para ello.

La hidrología nival tiene una gran importancia en la Cuenca del Ebro, ya que gran parte de sus afluentes, especialmente los de origen pirenaico, cuentan con un marcado aporte nival y condicionan en gran medida el régimen hidrológico de global de la Cuenca (López-Moreno and García-Ruiz, 2004)

Desde el punto de vista económico, la nieve desempeña un papel clave en el desarrollo socioeconómico de muchas áreas rurales en entornos de montaña. Y es que, a pesar de la diversificación turística de las últimas décadas, en una gran cantidad de áreas de montaña como los Pirineos, el turismo de invierno supone un sector clave en la economía de la región.

Para anticipar las consecuencias presentes y futuras de la dinámica del manto de nieve es necesaria información de calidad de la evolución espacio-temporal de la nieve en zonas de montaña. Ello permite a la comunidad científica mejorar la comprensión de los procesos en los que se la nieve juega un rol importante (Bavay & Grünewald, 2012.). Además, para una mayor eficiencia en la gestión de este recurso, disponer de observaciones detalladas es relevante de cara a anticipar las consecuencias de riesgos potenciales.

A la hora de conocer la cantidad de nieve de una cuenca se debe tener en cuenta tanto el espesor del manto nival como la densidad del mismo. Dado que la densidad de la nieve tiene una menor variabilidad el espesor del manto nival, éste se convierte es en un parámetro esencial para la previsión hidrológica. (López moreno *et al.*, 2013). Junto al espesor del manto, junto al

Snow Water Equivalent (equivalente agua- nieve, producto del espesor de la nieve y de la densidad) son es el otro los dos parámetros de mayor relevancia desde un punto de vista hidrológico.

La importancia de la nieve ha hecho que el desarrollo de la nivología y el estudio y monitorización del manto nivel haya sido especialmente intensivo en las dos últimas décadas (Erikson et al. 2005). En este trabajo, se va a poner a prueba la aplicabilidad de uno de los métodos que más desarrollo está teniendo en los últimos años, como es el uso de la técnica fotogramétrica sobre UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*, vehículos no tripulados) en un entorno de alta montaña del Pirineo aragonés.

Los métodos de teledetección son aquellos que, para el estudio del objeto en cuestión, no requieren contacto directo con el mismo. La utilización de técnicas de teledetección supuso una revolución en la nivología, ya que permitía el estudio de la nieve sin incurrir en riesgos para los investigadores, hacer campañas sin modificar las características del manto y abarcar áreas de estudio de una extensión impensable años atrás.

La metodología para el estudio de la criosfera que más ha evolucionado en los últimos años, sin lugar a duda, es el uso de fotogrametría sobre vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned aerial vehicles*, UAVs, o lo que es lo mismo, drones). Los dispositivos UAV aparecen como una metodología de gran utilidad, que a día de hoy suponen una solución eficaz, barata y que, debido a su naturaleza altamente automatizada, nos permiten monitorizar los distintos elementos de la criosfera, tanto glaciares (Guillot *et al.* 2015, Bhardwaj 2016, Imerzeel *et al.* 2014), como mantos nivales a una escala tanto espacial como temporal sin precedentes (Di Michele *et al.* 2016). A pesar de que en los años 60 aparecen los primeros estudios que hablan de uso de la fotogrametría aérea para el estudio de glaciares y mantos nivales, esta técnica no alcanza su desarrollo hasta décadas después, debido a la escasa capacidad de adaptación de las cámaras a los cambios de exposición solar a lo largo del vuelo. Esto, sumado al escaso desarrollo de los programas informáticos vinculados al tratamiento de estos datos, impedía una buena medición vertical del manto nival (Nolan *et al.* 2015).

Los satélites ópticos han permitido la monitorización de los diferentes elementos de la criosfera desde finales de los años 60 (Ramsay 1998). Los distintos tipos de sensores permiten su diferenciación de otros tipos de superficie y su posición en órbita respecto a la Tierra permite la monitorización de grandes áreas. Además, esta metodología cuenta con una resolución temporal muy elevada, llegando a disponer de imágenes multiespectrales diarias (Frei *et al.* 2012). Su mayor debilidad se encuentra en la resolución espacial. Satélites como Sentinel 2 o

Landsat 8, punteros en este campo, ofrecen una resolución espacial de 10, 20 y 30 m. Por tanto, su aplicación a escala de detalle en entornos de alta montaña es limitada debido a la complejidad del terreno y su influencia en el manto nival (Gascoin *et al.* 2019). Así mismo, también existen limitaciones ambientales como la presencia de nubes sobre las zonas de estudio.

Una de las tecnologías de teledetección más utilizadas en nivología desde hace poco más de una década es la basada en el LiDAR. Es una forma de teledetección activa que, a partir de la emisión de pulsos láser y la medición de su tiempo de retorno al sistema sensor, permite determinar la distancia entre este y la superficie de muestreo. La repetición sistemática y de manera regular de esta operación permite obtener nubes de puntos tridimensionales del área de estudio.

De este modo, la tecnología LiDAR utilizada se basa en el principio de tiempo de retorno del flujo emitido. Nuestro dispositivo LiDAR emite una serie de pulsos láser que son reflejados por la superficie muestreada para finalmente generar una nube tridimensional (Deems 2013). Estas coordenadas son tomadas por el dispositivo LiDAR en un sistema polar, es decir, mide la distancia angular; a posteriori, estas coordenadas polares son transformadas en coordenadas cartesianas con valores X-Y-Z. El cálculo de la distancia del dispositivo a la superficie de rebote es igual al tiempo de vuelo multiplicado por la velocidad de la luz partido y dividido entre dos (Petrie and Toth 2008).

Los dispositivos LiDAR pueden ser aerotransportados o terrestres:

- En los *Aerial Laser Scanner*, ALS, el sistema LiDAR va acoplado a una aeronave, lo cual le permite cubrir áreas de grandes dimensiones con una precisión centimétrica. Sin embargo, el enorme coste del equipamiento y la dependencia de la disponibilidad de una aeronave limitan mucho la frecuencia temporal de los datos (López Moreno *et al.* 2017).
- La otra variante de la metodología LiDAR es el conocido como *Terrestrial Laser Scanner* (TLS), metodología que, basada en el registro sobre la propia superficie terrestre, ha sido utilizada en este trabajo para validar los resultados obtenidos a partir de la técnica fotogramétrica aplicada desde un vehículo aéreo no tripulado.

Los dispositivos TLS van montados sobre un trípode instalado sobre tierra firme. Con la nube de puntos registrada en un sistema global es posible generar un Modelo Digital de Elevación (MDS) (Prokop 2008). Uno de los pasos más importantes es conocer la ubicación exacta de

nuestro dispositivo LiDAR; de esta manera, podremos ubicar los puntos de nuestro modelo de manera precisa.

Debido a que los dispositivos LiDAR proporcionan información de la superficie escaneada, para obtener un mapa de espesor de nieve es necesario comparar dos MDS: uno con la superficie de estudio en ausencia de nieve y otro con la superficie cubierta por nieve. Mediante la diferencia entre ambos es posible cuantificar el espesor de nieve (Grunewald *et al.* 2009)

Por otra parte, la adquisición de un equipo TLS es mucho más económica que una aeronave equipada para funcionar como ALS. Esta dependencia del método ALS a la disponibilidad de una aeronave limita mucho su uso (Prokop 2008).

Con el paso de los años, la reducción del tamaño de las aeronaves, sumada a la mejora en cámaras y precisión de los sistemas GPS (Harder *et al.* 2016) y, especialmente, de los algoritmos para la extracción de puntos comunes entre las diferentes fotos han permitido que la fotogrametría combinada con los UAVs se asiente como un método puntero para la observación de las diferentes características del manto nival (Avanzi *et al.* 2018).

Uno de los algoritmos referencia en la fotogrametría es, sin duda, *Structure from Motion* (SfM). Los algoritmos de SfM, que se ha utilizado en este trabajo, nos permiten pasar de un conjunto de imágenes en dos dimensiones tomadas con el dispositivo UAV, a modelos 3D georreferenciados.

Para calcular el espesor de nieve es necesario en primer lugar generar nubes tridimensionales de las superficies y, posteriormente, realizar la diferencia entre las superficies con y sin nieve. A partir del conjunto de imágenes, el software de procesamiento a través de los algoritmos SfM genera una nube de puntos comunes, la cual sirve como base para la construcción de un MDS. A partir de este, el procedimiento es muy similar al de la metodología LiDAR, ya que se obtiene de las diferencias entre un MDS con nieve y otro sin nieve (Bühler *et al.* 2016)

Estudios previos han mostrado que es posible alcanzar precisiones con UAV compatibles con el estudio de la nieve: Fernandes *et al.* (2018) logran una precisión de entre 5 y 10 cm en la horizontal y en torno a 10 cm en la vertical; Bühler *et al.* (2016) logran también una precisión, tanto horizontal como vertical, de 10 cm; Harder *et al.* (2016) obtienen una precisión de 2,5 cm en el plano horizontal y 7 cm en el vertical.

La inmensa mayoría de estudios anteriores relacionados con el uso de UAV para el estudio de la nieve expresan la necesidad de aplicar esta metodología en la mayor variedad de condiciones posibles (Bühler *et al.* 2015, Fernandes *et al.* 2018, Avanzi *et al.* 2018): vegetación, iluminación, condiciones del manto nival, meteorología adversa... Y de esta manera establecer sus límites de aplicación, así como sus condiciones óptimas de uso.

Guiados por esta necesidad, en este trabajo se han realizado 5 vuelos a diferentes horas realizados los días 21 y 22 de febrero de 2019 en la cuenca de Izas, en el Pirineo aragonés. Esto se traduce en diferentes condiciones de iluminación para intentar determinar en qué medida afecta una mejor o peor iluminación del área de estudio en la calidad de las nubes de puntos derivadas de la técnica fotogramétrica y, por tanto, en la precisión a la hora de estimar el espesor del manto nival. Para ello, se utilizará como referencia un método contrastado y perfectamente validado como es el láser escáner terrestre.

Aprovechando la realización de los diferentes vuelos, se realizarán cartografías de espesor de nieve de nuestra área de estudio, con el fin de observar la variabilidad espacial que este presenta y hacer una introducción a cómo la topografía influye en los patrones de acumulación de nieve a escala de detalle.

2. OBJETIVOS

El objetivo global de este trabajo es el siguiente:

Validar los productos obtenidos desde un UAV a partir de la técnica fotogramétrica y analizar la aplicación de esta técnica para el estudio de la nieve en zonas de alta montaña. Se pondrá especial énfasis en el papel que juega la iluminación del área de estudio en la calidad de las nubes de puntos, y de esta manera, caracterizar unas condiciones idóneas de iluminación para la aplicación de esta metodología. Para ello, se compararán sus resultados con los obtenidos a partir de un método de estudio contrastado y validado en este ámbito como es el láser escáner terrestre.

Este objetivo general se subdivide en los siguientes sub-objetivos:

- a) Realizar una aproximación teórica a los procesos de planificación de vuelo, vuelo del UAV en el terreno y post-proceso con todas sus etapas: georreferenciación de imágenes, generación de nubes de puntos y MDSs, y realización de mapas de nieve.

- b) Analizar cómo influye la iluminación del área de estudio en las nubes de puntos derivadas de las imágenes obtenidas desde el dispositivo UAV. De este modo, encontrar las condiciones de iluminación idóneas para la realización de campañas de toma de datos con un dispositivo UAV, comparando las superficies obtenidas con el UAV y las del escáner terrestre.
- c) Generar mapas de la distribución espacial del manto de nieve.
- d) Encontrar posibles patrones espaciales de acumulación de nieve en nuestra área de estudio a través de cartografías de nieve y análisis estadístico de relación entre las diferentes características del terreno con el espesor del manto de nieve.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio de este trabajo es la cuenca de Izas. Se localiza en el Valle de Tena, en el Pirineo aragonés occidental. Su red hidrológica drena hacia el río Gállego. Su extensión es de unas 55 ha, situada entre los 2000 y los 2300 m de altitud (42844' N, 0825' W). La exposición de la cuenca a influencias atlánticas hace que los inviernos sean bastante húmedos (Revuelto *et al.* 2014); la temperatura media anual es de 3° C y presenta 130 días al año con temperaturas por debajo de 0° C (López Moreno *et al.* 2014). En cuanto a la precipitación, la cuenca de Izas acumula en promedio 2.000 mm anuales, de los cuales aproximadamente 1.000 mm son en forma de nieve. La temporada de nieve abarca desde las primeras nevadas a principios de noviembre hasta la fusión total de la nieve en la segunda mitad de junio (Anderton *et al.* 2004).

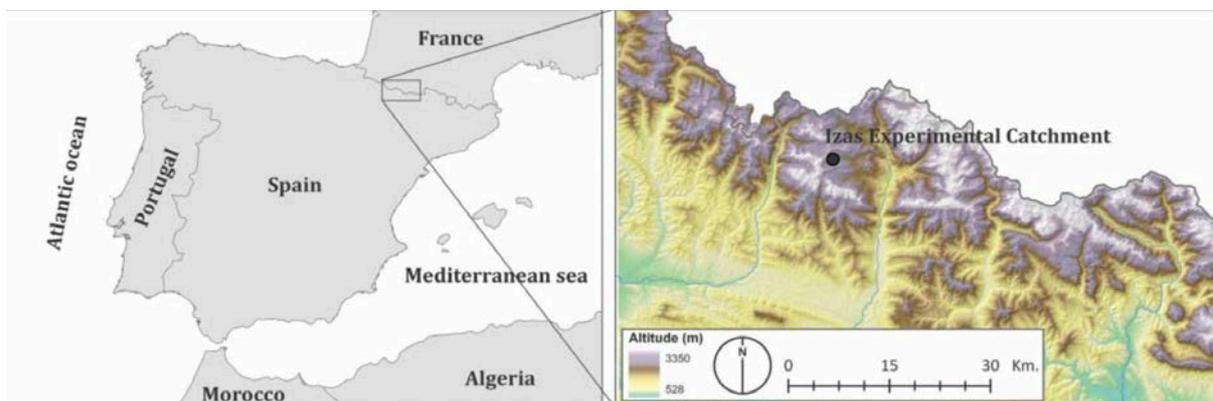
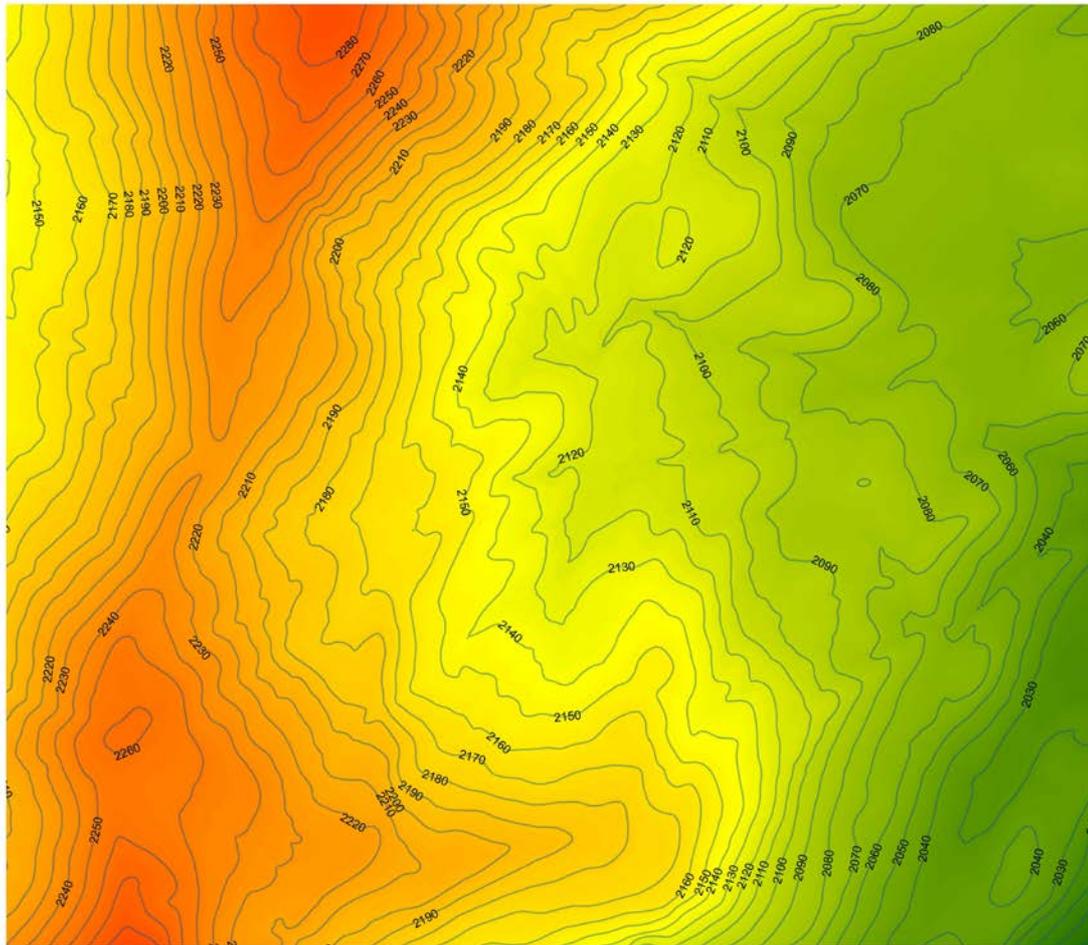


Figura 1: Mapa de localización del área de estudio



Altitud



Máxima : 2313,5

Mínima : 1962,24

— Cruva de nivel (10 metros)

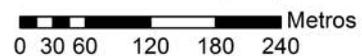


Figura 2: *Altitud de la cuenca de Izas*

Los vientos dominantes son NW-SE (López Moreno *et al.* 2012). La cobertura principal son los pastos, combinados con roca desnuda especialmente en las zonas con pendientes más abruptas La pendiente media del área de estudio es de 16° (López Moreno *et al.* 2010). Es un ambiente de pastos subalpinos alpinizados, surgidos de la deforestación de *Pinus uncinata para la creación de pastos para el ganado*. Presenta una ausencia total de árboles, por ello, es una zona muy interesante para el estudio de la nieve, ya que tan solo existe interacción con la topografía. Aproximadamente, el 15% de la cuenca presenta afloramientos rocosos. Además,

esta cuenca lleva siendo monitorizada por el Instituto Pirenaico de Ecología desde principios de los años 90, disponiéndose de una extensa base de datos (Alvera, 2000, Anderton *et al.* 2004, Lana-Renault *et al.* 2010, López-Moreno *et al.* 2010, 2012, Revuelto *et al.* 2012, 2014, 2017).

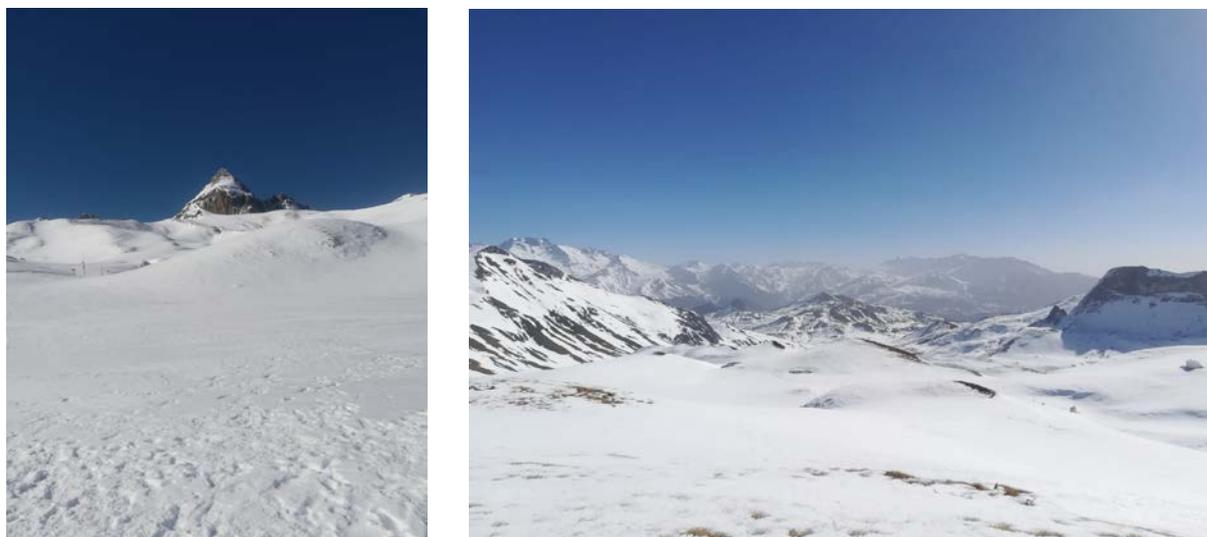


Figura 3: *Fotografías oblicuas del área de estudio*

4. METODOLOGÍA

Esta sección describe la metodología de adquisición, procesamiento y evaluación de los datos obtenidos con el dispositivo UAV eBee plus. En primer lugar se presenta la metodología de diseño y adquisición de información en campo tanto con UAV como con láser escáner terrestre. Posteriormente se presenta el procesamiento de la información.

4.1. Dispositivo UAV

Para la toma de datos se ha utilizado el UAV eBee Plus del grupo SenseFly (<https://www.sensefly.com/UAV/ebee-mapping-UAV/>). El eBee Plus es un UAV de ala fija de 110 cm de envergadura y 1,1 kg de peso. Es capaz de volar a 90 km/h y resistir vientos de hasta 45 km/h. Su autonomía de vuelo es de 59 minutos, en los que puede llegar a abarcar áreas de 4000 ha. Cuenta con un método de georreferenciación RTK y PKK, lo que permite la corrección automática de la posición de las imágenes en pleno vuelo, otorgándole una precisión absoluta de entre 3 y 5 cm tanto en el plano horizontal como en el vertical. El eBee Plus puede ir equipado con distintas cámaras. En nuestro caso hemos trabajado con la cámara S.O.D.A., una cámara de alta precisión diseñada para la fotogrametría que trabaja en la longitud de onda del visible (400-700 nm) y cuenta con una resolución de 20 megapíxeles.



Figura 4: *Dispositivo UAV eBee plus*

4.2. Vuelos: planificación y adquisición de datos

4.2.1. Planificación de la misión

La planificación de la misión condiciona en gran medida la precisión de los productos derivados de las imágenes tomadas por el UAV y, por tanto, tiene una influencia notable en los resultados finales de la investigación. Por ello, una planificación cuidadosa ayuda a minimizar errores en el proceso de toma de datos. A la hora de planificar el vuelo de nuestro dispositivo UAV hay que tener en cuenta numerosos factores, tanto relativos a los comandos y características del vuelo que transmitimos al UAV como a las condiciones ambientales del momento del vuelo.

El primer grupo abarca aquellas características y acciones que el investigador cree necesario que el dispositivo UAV realice durante el vuelo, es decir, relativas al plan de vuelo.

Elegir la altura de vuelo, el solapamiento tanto frontal como lateral de las imágenes o algo tan simple como encontrar un emplazamiento seguro para aterrizaje y despegue pueden ser de vital importancia a la hora de reducir el error de nuestros resultados y evitar daños a nuestro dispositivo UAV. Vamos a señalar a continuación cuáles son los principales aspectos a la hora de planificar el vuelo y cómo podemos minimizar el error a través de los mismos:

- La altitud de vuelo respecto al suelo es un parámetro básico para la adquisición de datos. Según la resolución espacial deseada se ajusta a una mayor o menor altitud. Cuanto mayor es la altitud de vuelo, menor resolución de la información debido a que cada píxel del sensor de la cámara cubre una mayor superficie.

- El solapamiento de las imágenes, tanto lateral como longitudinal, condiciona la densidad de la nube de puntos posteriormente generada con el algoritmo SfM; a mayor solape mayor facilidad de encontrar puntos comunes entre las distintas imágenes. Como podemos ver en la figura 5 casi toda el área de estudio apareció en al menos 5 fotografías exceptuando los márgenes en cada uno de los vuelos.
- Encontrar un lugar adecuado para despegue y aterrizaje supone identificar una zona llana y relativamente amplia que permita al dispositivo UAV coger altura en el despegue sin obstáculos y descender suavemente en el aterrizaje.

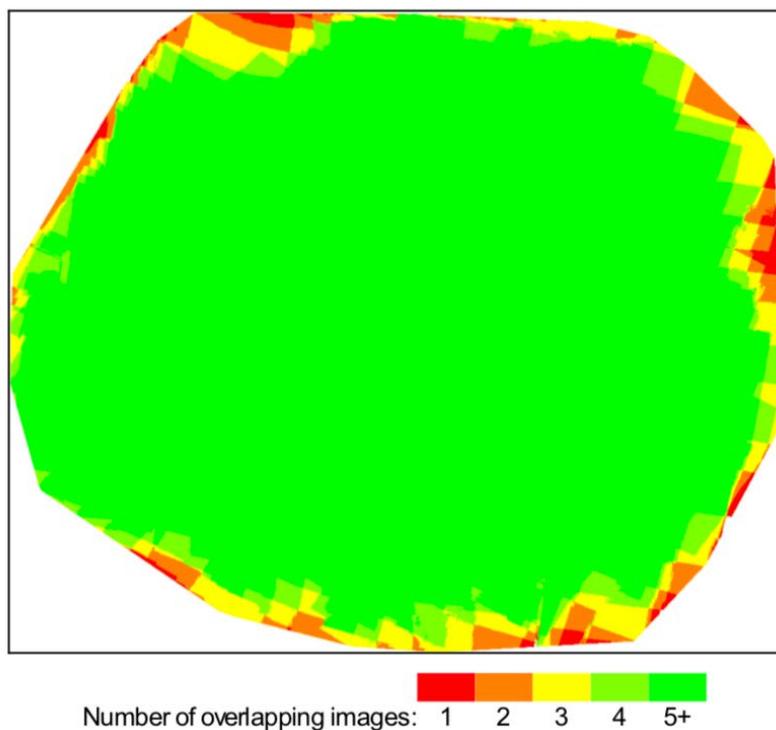


Figura 5: Solape de las imágenes en las distintas zonas del área de estudio

Las condiciones ambientales también condicionan la calidad de los productos derivados de las imágenes obtenidas por el dispositivo UAV y por ello hay que tenerlas en cuenta a la hora de planificar las campañas.

- Meteorología: Especialmente la dirección y velocidad del viento, así como la frecuencia e intensidad de las rachas. A pesar de que los sistemas UAV actuales están diseñados para soportar viento durante el vuelo, intensidades elevadas pueden desestabilizar el dispositivo y, por tanto, dificultar el vuelo; así mismo, pueden reducir considerablemente la duración de las baterías del dispositivo.

- **Iluminación:** En entornos de montaña, un ángulo de incidencia solar bajo puede generar sombras topográficas en el área de estudio. Estas sombras pueden alterar el funcionamiento de los algoritmos encargados de generar las nubes de puntos. Por tanto, un área de estudio con mayor o menor iluminación se traducirá seguramente en resultados diferentes.

4.2.2. *Diseño del plan de vuelo*

El primer paso a la hora de diseñar la misión es seleccionar el área de estudio. Teniendo como base un MDS de la zona, delimitamos el área que queremos que sobrevuele el dispositivo UAV. Junto con el área de estudio es necesario señalar las zonas de despegue y aterrizaje planificadas y los puntos *Home* y *Start*. El punto *Start* es el punto en el aire al que el dispositivo UAV acude tras realizar la maniobra de despegue y desde donde inicia la misión. Por el contrario, *Home* es aquel punto al que acude el UAV antes de iniciar la maniobra de aterrizaje.

La misión, además de los puntos *Start* y *Home*, está compuesta por una serie de *waypoints* a lo largo del área de estudio. Un *Waypoint* es un punto en el que el UAV tiene orden de realizar una acción, bien sea tomar una foto, realizar una maniobra o dirigirse al siguiente *Waypoint*. Es el propio software el que elige la distribución de estos puntos y, por tanto, el itinerario de vuelo a seguir por el UAV.

4.2.3. *Adquisición de información con el UAV sobre el terreno*

Con la misión diseñada, ya en el área de trabajo, se procede al montaje del dispositivo UAV, que es relativamente sencillo. En primer lugar, se conecta la cámara y se coloca en el espacio habilitado para ello. Ensamblamos las alas al cuerpo central del dispositivo. Tras ello se comprueba el buen estado de hélice y alerones. Para finalizar se conecta la baliza y se comprueba que todos los componentes estén en orden.

Una vez montado el UAV se realiza la conexión con el dispositivo de control (ordenador/tablet) vía modem permitiendo la comunicación UAV - puesto de control en todo momento. Para que el software de vuelo ubique al dispositivo UAV con la mayor precisión posible se selecciona la estación GPS más cercana. Tiene además una influencia esencial en la eficacia del método de georreferenciación RTK, del cual hablaremos más adelante.

Tras la conexión con el ordenador, el UAV está listo para el despegue. El despegue se debe realizar en contra del viento por cuestiones aerodinámicas. Además, antes de lanzarlo, el UAV debe posicionarse sobre el suelo, sujeto con las manos, con un ángulo de 45°, facilitando así la

maniobra. Una vez en el aire, el UAV realiza el vuelo de forma autónoma, pudiendo desde el dispositivo de control (ordenador, tablet...) modificar el plan de vuelo en todo momento y, si fuese necesario, realizar maniobras de aterrizaje de emergencia.

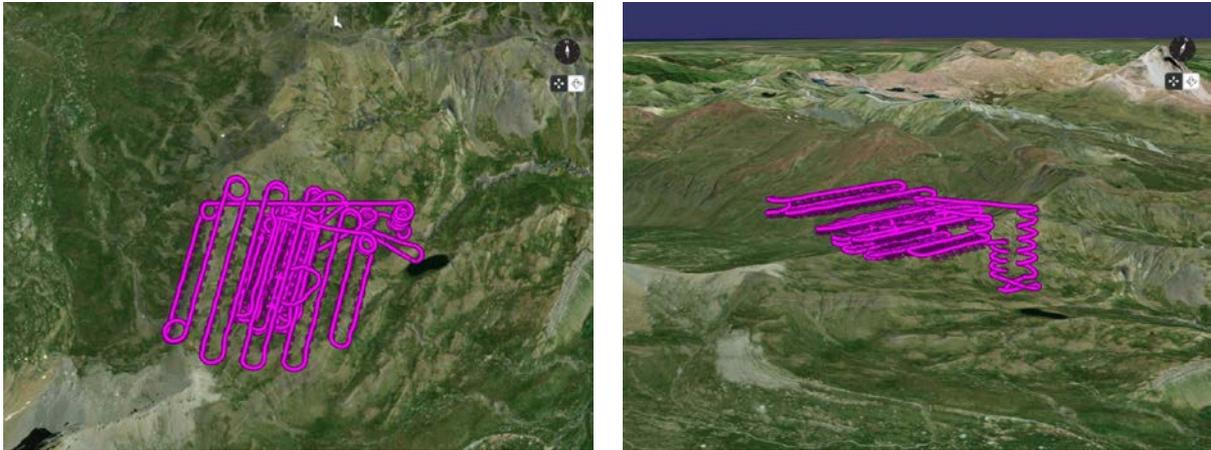


Figura 6: Plan de vuelo del UAV en eMotion 3.7

El eBee Plus cuenta con un sistema de georreferenciación RTK que permite la georreferenciación de las imágenes en campo de manera simultánea al vuelo. El *Real Time Kinetic* (RTK) es un método de georreferenciación de alta precisión, capaz de ubicar a tiempo real en 3 dimensiones nuestro UAV (Stempfhuber and Buchholz 2011).

El ordenador o dispositivo vinculado al UAV se conecta a través de la red a una estación de la GNSS. De este modo crea una triangulación entre la estación GNSS, el modem en tierra y el UAV. Por ello, para que este método funcione de manera adecuada, es imprescindible la conexión a la red móvil con 4G a lo largo de todo el vuelo. Esto permite georreferenciar las fotos de manera automática y simultánea al vuelo. Los valores de coordenadas son almacenados en archivos que contienen diferentes datos acerca del vuelo, llamados *logs*, que se añaden a través de eMotion en el postproceso. (eMotion 2.7 user manual revision 2.1, 2018)

De este modo, al descargar la información obtenida por el UAV en el ordenador, encontramos por un lado las imágenes que han sido tomadas durante la misión y por otro los ficheros *logs*, que contienen la información del vuelo: coordenadas, altitud del vuelo, duración, viento, velocidad... y que, por tanto, son vitales para la georreferenciación de las imágenes a través del método RTK.

Anteriormente se ha hecho referencia a la necesidad de conexión constante a la red para la georreferenciación automática. El problema es que en entornos de alta montaña, como la cuenca de Izas, la conexión es muy volátil. Por ello, en algunos momentos del vuelo la

conexión se pierde y como consecuencia algunas fotografías no son georreferenciadas correctamente.

A través En este trabajo se han realizado 5 vuelos los días 21 y 22 de febrero de 2019, en la cuenca de Izas con nuestro UAV eBee plus. Los vuelos fueron realizados a diferentes horas, buscando diferentes condiciones de iluminación para comprobar los efectos de estas en las nubes de puntos de los diferentes vuelos. La altitud de los vuelos fue de 200 m sobre el nivel del suelo con unas condiciones climáticas favorables como se especifica en la tabla 1. El solapamiento de las imágenes fue de 80% en la horizontal y 60% en la frontal. Las misiones han sido diseñadas y llevadas a cabo con el software eMotion (3.7 [software] 2018)

Tabla 1: Caracterización de los 5 vuelos realizados los días 21 y 22 de febrero de 2019

VUELOS	FECHA	HORA	N.º DE FOTOS	OBSERVACIONES
Vuelo I	21/2/2019	13:00	140	Zenith solar, sin sombras topográficas. Despejado y con pequeñas rachas de viento de ladera no superiores a 2 m/s.
Vuelo II	21/2/2019	16:35	141	Despejado. Aparecen sombras topográficas en el área de estudio. Viento de ladera no superior a 2 m/s.
Vuelo III	21/2/2019	17:45	140	Ocaso solar. Despejado. Sin sombras topográficas, pero tampoco iluminación solar directa.
Vuelo IV	22/2/2019	8:00	142	Amanecer. Despejado. Carente de sombras topográficas. Viento de ladera combinado con rachas NW-SE entre 3 y 5 m/s.
Vuelo V	22/2/2019	9:45	141	Despejado. Presencia de sombras topográficas ligadas al ángulo de incidencia solar. Viento de ladera entre 3 y 4 m/s.

4.2.4. Campaña de láser escáner

El 21 de febrero de 2019 se realizó una campaña de adquisición de datos en campo con un dispositivo TLS, de manera coordinada con la campaña de UAV. Se realizaron dos escaneos del área de estudio, desde puntos diferentes. De este modo conseguimos datos de un área más extensa, ya que el láser escáner es una tecnología que únicamente recoge datos de su línea de visión. Por tanto, desde diferentes posiciones de escaneo ampliamos el campo de visión del dispositivo. Las nubes de puntos derivadas fueron georreferenciadas a partir de 14 reflectores

con coordenadas conocidas, técnica denominada *Ground Control Points* (GCPs) (Tonkin and Midgley 2016), permitiendo compararlas con las nubes de puntos del dispositivo UAV.

4.3. Postproceso y tratamiento de la información

4.3.1. Georreferenciación

Para obtener una precisión óptima, tanto horizontal como vertical, en nuestros productos, la georreferenciación de las imágenes es un paso esencial en el tratamiento de las fotografías tomadas por nuestro sistema UAV.

La primera parte del postproceso es la orientada a la georreferenciación de las imágenes mediante el método RTK. Si bien es un método a tiempo real, la información espacial de las diferentes imágenes queda almacenada en el *log* del vuelo. Por tanto, el primer paso es transferir esta información a las imágenes del *dataset* para que queden completamente georreferenciadas. Este proceso se realiza con el software eMotion.

A pesar de que el eBee Plus cuenta con sistema de georreferenciación RTK, hay imágenes que no han podido ser georreferenciadas mediante este método por fallos en la conexión. Por ello, esta parte del proceso está orientada a la georreferenciación de las imágenes que no lo han sido mediante el método RTK. Para ello utilizamos el método PPK/*Stand alone*. Este método está basado en la corrección, en el postproceso, de la posición del UAV en las distintas fases del vuelo a través de archivos *Rinex* (eMotion 2.7 user manual revision 2.1, 2018)

Rinex es un formato de almacenamiento de información sobre la posición en el espacio (X,Y,Z), la velocidad y otras magnitudes físicas de un receptor, en nuestro caso el UAV, proporcionadas por una extensa red de satélites que incluye GNSS, Galileo, GLONASS y SBAS (Gurtner and Estey 2007). Estos archivos *Rinex* acumulan los datos de un periodo de tiempo determinado, generalmente unas horas, dependiendo de la institución que los gestione.

Así pues, para este estudio se han utilizado los *Rinex* de la Red de Geodesia Activa de Aragón (ARAGEA), ofrecidos para descarga libre en su portal web (ARAGEA- [Consultado 12/03/2019] disponible en: <https://gnss.aragon.es>)

Su descarga es tan sencilla como seleccionar la estación de ARAGEA más cercana, que en nuestro caso es la de Sabiñánigo. Como se acaba de mencionar, los archivos *Rinex* acumulan datos de un periodo de tiempo, que en ARAGEA es de una hora de duración. Por tanto, para la georreferenciación de las imágenes, descargamos los archivos *Rinex* de las horas que

comprendían nuestros vuelos. Con los archivos ya descargados y mediante el software eMotion se aplican las correcciones espaciales y contamos con un *dataset* de imágenes completamente georreferenciado con una gran precisión. Por lo general, estas imágenes representan una proporción muy baja respecto al *dataset* completo de cada vuelo como puede verse en la Tabla 2.

Tabla 2: *Número de fotos georreferenciadas con cada método en cada uno de los vuelos*

VUELO	N.º FOTOS	GEORREFERENCIADAS MEDIANTE RTK	GEORREFERENCIADAS MEDIANTE PPK
Vuelo 1	140	138	2
Vuelo 2	141	130	11
Vuelo 3	140	140	0
Vuelo 4	142	141	1
Vuelo 5	141	140	1

4.3.2. *Generación de nubes de puntos y MDSs. Structure from Motion (SfM)*

Como se ha mencionado previamente, las cartografías de espesor de nieve se obtienen a partir de la diferencia entre dos modelos digitales de superficie (MDS) del área de estudio: uno sin nieve y otro con presencia de nieve.

La fotogrametría, como método, debe prácticamente toda su utilidad a los algoritmos de SfM. Por ello, como se ha mencionado en la *Introducción*, la aplicación de los sistemas UAV en las ciencias de la tierra ha ido de la mano de la introducción y mejora en este ámbito de los algoritmos SfM, que permiten pasar del *dataset* de imágenes y datos de vuelo que extraemos de las campañas con UAV a unas nubes de puntos y unos MDS a escala detalle.

SfM es un algoritmo de fotogramétrica orientada a las reconstrucciones topográficas en zonas de difícil acceso y topografía compleja. Es capaz de crear nubes de puntos 3D georreferenciadas a partir de un conjunto de imágenes solapadas tomadas de diferentes posiciones. El conjunto de algoritmos operante en SfM extrae una serie de puntos y características comunes de una serie de imágenes contiguas que se superponen en ciertas zonas. Por tanto, se adecua a paquetes de imágenes con un alto grado de solapamiento (Westoby 2012). Para este proceso es necesario que el área de estudio esté fotografiada desde diferentes posiciones, asumiendo que ésta permanece estática. De este modo la construcción del modelo nace de la unión de las diferentes texturas observadas en las fotografías desde diferentes

posiciones. Es por ello que un manto nival reciente y de textura homogénea puede suponer un problema a la hora de buscar puntos y estructuras comunes en las diferentes fotografías (James and Robson 2012).

El proceso realizado por los algoritmos SfM comienza con la labor realizada por el algoritmo SIFT, el cual se encarga de detectar conjuntos de características y rasgos comunes en las diferentes fotos (Schonberger *et al.* 2016). Tras ello, el sistema asigna unos descriptores a cada punto identificado en múltiples imágenes (*Keypoints*). A través de los descriptores empareja los *keypoints* con una distancia euclidiana menor en cada par de imágenes (Lowe 2004) a través del algoritmo *approximate nearest neighbour* (ANN). Esta es la parte del proceso conocida como "*Matching*". Los "matches" están verificados a través del proceso conocido como "Verificación geométrica". Para realizar esta verificación el sistema reconstruye el entorno geométrico de los diferentes *keypoints* de cada par de imágenes; lo hace a través simulaciones en las que modifica los parámetros de posición de la cámara. Si en dichas simulaciones se encuentran las suficientes coincidencias en cada par de imágenes el sistema acepta como válidos los elementos comunes en estas dos imágenes (Snavely *et al.* 2007).

Una vez verificados los elementos comunes entre cada par de imágenes, éstos son agrupados en *tracks*. Un *track* es un conjunto de un mínimo de 2 *keypoints* conectados entre sí en al menos 3 imágenes (Westoby 2012). La agrupación de *keypoints* que aparecen en distintas imágenes en *tracks* se lleva a cabo a través de la reconstrucción de los parámetros de posición de la cámara. Los diferentes parámetros de posición de la cámara sumados al conjunto de *keypoints* permiten la reconstrucción geométrica de la escena a través de un proceso de triangulación, ubicando, a través de este proceso, los puntos en un espacio tridimensional (Schonberger *et al.* 2016). Con unos puntos ubicados en 3D y un entorno geométrico construido se aplica el *Bundle adjustment*, es decir, un ajuste de los parámetros anteriores que tiene como resultado una nube de puntos de baja densidad. Para aumentar la densidad de la misma, nuestro software Pix4D Mapper realiza una redensificación tomando como base los algoritmos *Multi View Stereo* de Fukurawa and Ponce (2004).

En la figura 7 vemos el número de puntos comunes en 3D que el algoritmo es capaz de ubicar a partir de la reconstrucción de los parámetros de la cámara y los puntos comunes reconocidos en las fotografías tomadas por el dispositivo UAV.

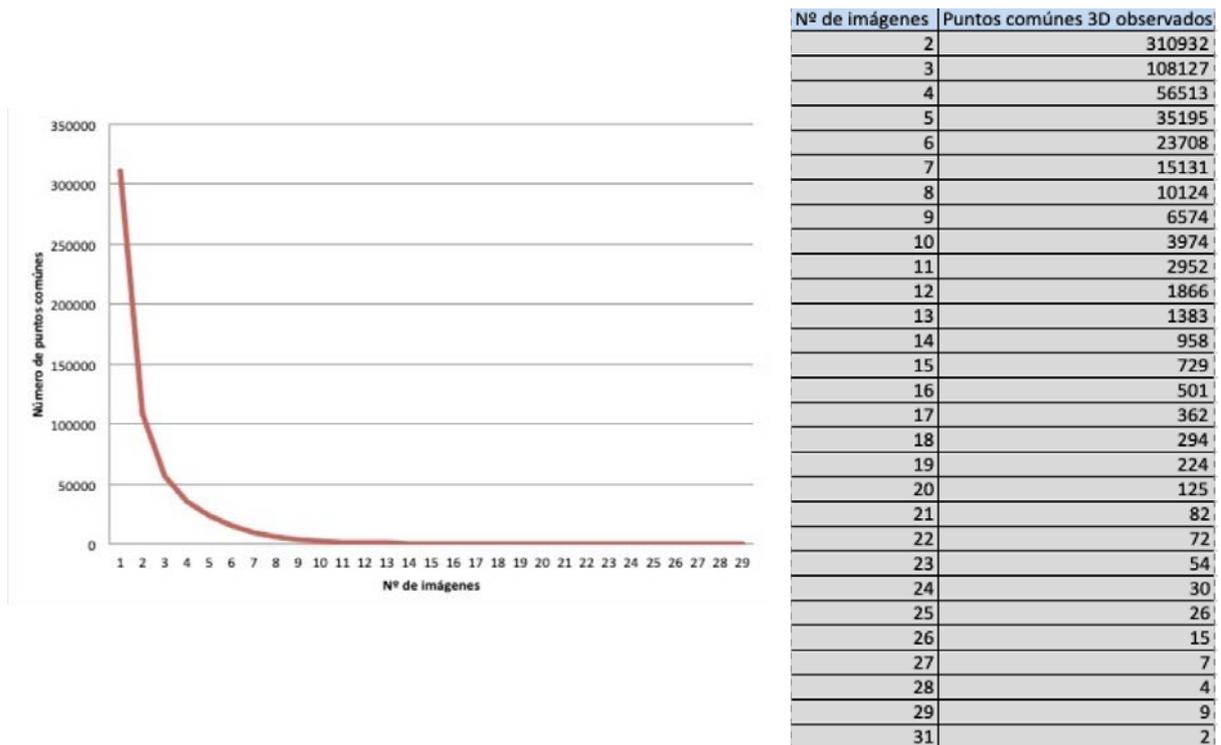


Figura 7: Número de puntos comunes encontrados por cantidad de fotos

4.3.3. Comparación con láser escáner (TLS) y generación de mapas de nieve

Una vez obtenidas las nubes de puntos, han sido trabajadas a través del software CloudCompare (2.10.2 [software] 2019). Este software nos permite tanto la visualización de las nubes de puntos como su edición y comparación con otras nubes de puntos o MDSs. En este caso se ha trabajado sobre todo con nubes de puntos, ya que gracias a la visualización en 3D y RGB permite una mejor observación de patrones espaciales a escala detalle.

La posibilidad de visualizar la nube de puntos en color real es una opción muy interesante para este trabajo ya que nos permite diferenciar las zonas de sombra y las zonas con y sin nieve de un solo vistazo.

Para poner a prueba la precisión de las nubes de puntos derivada de nuestro dispositivo UAV se han comparado con la nube de puntos generada con TLS, obtenida en la misma campaña de trabajo de campo.

Se ha tomado como método de referencia el láser escáner ya que es un método totalmente validado en nuestra área de estudio. Para realizar las comparaciones realizamos un "mesh" a las nubes de puntos del UAV. En este proceso se genera una superficie a partir de los puntos de la nube de puntos mediante polígonos Thiessen. Tras ello calculamos las distancias

entre los puntos de la nube de puntos del TLS y la superficie derivada del UAV. De este modo contamos con un mapa en el que queda reflejada la desviación de cada punto de la nube de puntos del UAV respecto al láser escáner. Esta comparación se ha realizado en las zonas comunes entre ambas nubes de puntos, por lo que las zonas en las que difieren la una de la otra quedan sin datos, en blanco.

Para generar la cartografía de espesor de nieve, el procedimiento es similar. Tomamos como base el primer vuelo LiDAR-PNOA del 2010 del Instituto Geográfico Nacional LiDAR PNOA, 2010: Instituto Geográfico Nacional [consultado el 8/3 de 2019] disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es>]

El vuelo LiDAR había sido realizado sin nieve, por lo que era válido para calcular el espesor del manto nival. Este necesitó un filtrado para ofrecer resultados correctos ya que contaba con un *offset* de 40 m respecto a las nubes de puntos derivadas del dispositivo UAV. Una vez ajustados los dos vuelos, generamos una superficie (*mesh*) a partir del vuelo LiDAR-PNOA y calculamos las distancias entre dicha superficie y la nube de puntos generada a partir de las imágenes del UAV. De este modo obtenemos una cartografía de valores de espesor de nieve a través de las diferencias entre la nube de puntos obtenida a través de la técnica fotogramétrica con fotos del UAV y el vuelo LiDAR-PNOA.

Para comparar la respuesta de la nube de puntos ante las diferentes condiciones de iluminación se han recortado las zonas de sombra de las nubes de puntos para compararlas con el mapa de diferencias respecto al láser escáner y determinar en qué medida el error del UAV es debido a las condiciones de iluminación. Para poder cuantificar la influencia de la iluminación en los productos finales tanto la nube de puntos de las zonas de sombra como los mapas de diferencias han sido rasterizados y comparados a través de ArcGIS (10.3 [software] 2014.).

4.4. Correlación entre la acumulación de nieve y las principales variables topográficas

Otro de los objetivos del trabajo es el de, a través de un mapa de espesor de nieve, observar los diferentes patrones espaciales de acumulación y establecer una relación entre diferentes características topográficas y el espesor del manto nival. Para ello hemos generado, a partir del MDS del vuelo LiDAR-PNOA, modelos de curvatura, pendiente, radiación potencial y *Topographic Position Index* (TPI). Este último es un índice topográfico que tiene en cuenta la altitud y posición de un punto o celda ráster en relación con su entorno; se calcula restando la altitud de un punto en concreto de nuestro modelo a la altitud media de un área con

un radio definido, tomando como centro dicho punto (De Reu *et al.* 2013). Por tanto, si una celda dentro de nuestro modelo presenta un TPI positivo, esto indica que se encuentra a una altitud superior a su entorno. Para ello, se han tomado 500 valores aleatorios, de idéntica posición, de todos los modelos. A partir de estos valores se ha calculado una correlación simple entre cada una de las variables y el espesor del manto nival. Se escoge una muestra de 500 valores ya que, además de la enorme dificultad computacional que supone trabajar con todos los puntos, si ampliamos la muestra la significación va a tender a aumentar. Para realizar la correlación se calculó el test de normalidad de Shapiro-Wilk. Los valores obtenidos reflejaron que los datos no presentaban una distribución normal. Por ello, se realizó la prueba no paramétrica de Spearman para distribuciones no normales.

Una de las mayores trabas encontradas en el tratamiento de la información ha sido gestionar la gran cantidad de información que se ha generado. La nube de puntos generada a partir del vuelo 1, el realizado en mejores condiciones de iluminación, tiene un peso de 12,2 Gigabytes y el mapa de espesor de nieve de la cuenca de 19 Gigabytes. Estos han causado problemas computacionales con todos los equipos informáticos y programas con los que se ha trabajado a lo largo del proceso.

5. RESULTADOS

5.1. Comparación con láser escáner terrestre

Tras la comparación de los 5 vuelos realizados se puede constatar que la precisión de las nubes de puntos del UAV respecto del TLS (método de referencia) varía en gran medida de unos vuelos a otros. En la tabla 3 observamos que indicadores como el error medio, la desviación estándar o el número de puntos obtenido presentan valores muy dispares. Estos valores oscilan entre -0,01 m y 0,22 m en el caso del error medio; entre 0,31 y 1,297 la desviación estándar; y de 254.256.297 a 16.853.374 puntos por nube. Respecto al error absoluto los valores oscilan entre 0,07 m y 1 m. Se observa un patrón claro en el que los vuelo con mejor iluminación obtuvieron valores de precisión sustancialmente superiores que aquellos realizados en condiciones de iluminación deficientes.

Por buenas condiciones de iluminación entendemos unas condiciones en las que el área de estudio se encuentre completamente iluminada. Por tanto, cuanto menor sea la proporción de área de estudio que se encuentra iluminada, peores serán las condiciones de iluminación. Si ordenamos de mayor a menor por nivel de precisión en las tres variables obtenidas los vuelos

seguirían el orden inverso que si fuesen ordenados por superficie en sombra. A la hora de valorar la precisión vertical tenemos que tener en cuenta que los productos del dispositivo UAV cuentan con una incertidumbre en torno a los 10 cm.

Tabla 3: Comparación de la precisión de los 5 vuelos respecto a valores obtenidos con TLS

VUELO	ERROR MEDIO RESPECTO A TLS	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	ERROR ABSOLUTO RESPECTO A TLS	Nº DE PUNTOS	CONDICIONES DE ILUMINACIÓN
Vuelo I	-0,01 m	0,31	0,07m	254.256.297	Área completamente iluminada
Vuelo II	-0,02 m	0,39	0,15m	60.615.773	Área con presencia de sombras topográficas
Vuelo III	0,04 m	1,29	1m	37.883.205	Área sin iluminación directa
Vuelo IV	-0,04 m	0,26	0,13m	16.853.374	Área con presencia de sombras topográficas
Vuelo V	-0,01 m.	0,18	0,09m	52.386.342	Área con sombras topográficas casi imperceptibles

En la figura 8 se observa un modelo de distribución espacial de las diferencias entre los productos UAV y TLS comparado con una vista nadir de la nube de puntos en RGB. Esta imagen permite una comparación visual entre la distribución del error y la distribución de las zonas de sombra en el área de estudio. Un patrón que se observa en todos los vuelos con presencia de sombras topográficas es la ausencia de datos (además de las zonas no comunes entre ambas nubes de puntos) en las zonas escasamente iluminadas. Además, entorno a las zonas de sombra en las que es imposible generar datos aparecen los valores de error más elevados. Es destacable ya que estas zonas sin datos no son cuantificadas como error en las estadísticas que se han generado en este trabajo, pero condicionan en gran medida la calidad de la nube de puntos.

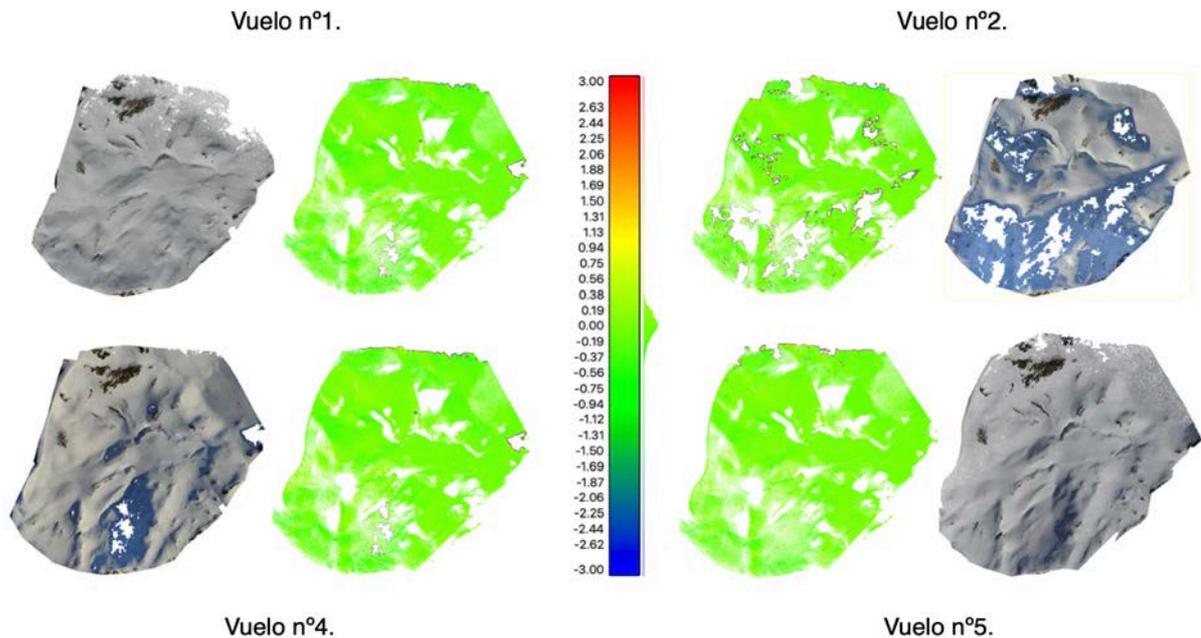


Figura 8: *Diferencias de los diferentes vuelos respecto al modelo generado con láser escáner en el área de estudio. cada vuelo cuenta con su nube de puntos correspondiente en color real orientada a la visualización de las sombras*

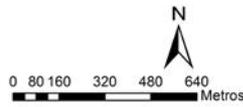
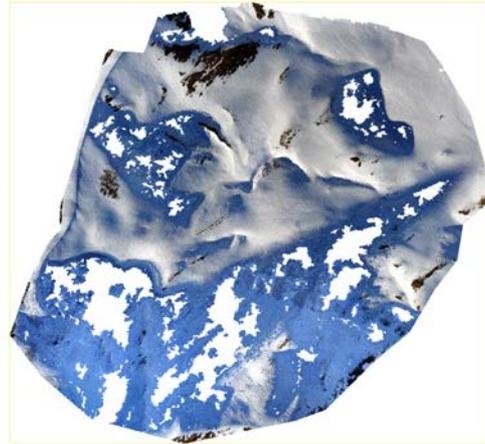
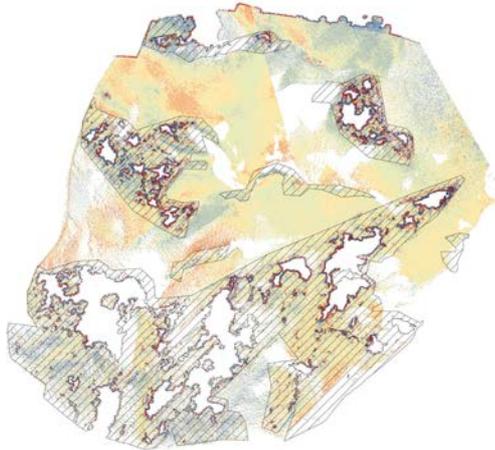
Para analizar la respuesta en un mismo vuelo a los cambios de iluminación se han rasterizado, a 1 metro de resolución, las nubes de puntos de diferencias entre UAV y láser escáner de los vuelos 2 y 4 ya que son los vuelos que cuentan zonas iluminadas y zonas de sombra presentando un mayor contraste. Los valores amarillentos indican un menor error mientras que los tonos rojos y azules indican un mayor error por exceso y por defecto respectivamente con errores máximos de ± 3 metros. En las zonas en sombra se puede observar la ausencia de tonos amarillos, lo que nos indica una presencia de error elevada en estas zonas. A pesar de que en las zonas iluminadas podemos encontrar valores de error alto, esto aparecen con mayor frecuencia en las zonas cercanas a las sombras. Lo que es una constante en todos los modelos, es la ausencia de datos en las zonas donde la iluminación es deficiente.

La ausencia de datos en zonas de sombra ha supuesto un problema para la cuantificación de la diferencia de precisión entre las zonas iluminadas y las de sombra. Un estadístico muy común para la comparación de densidades de nubes de puntos es la cantidad de puntos por metro cuadrado. Al generar este estadístico estas zonas en las que los algoritmos no consiguen encontrar puntos comunes no son cuantificadas como error y por tanto muchos de los valores de puntos/m² son similares (o incluso superiores) en las zonas de sombra respecto

a las zonas soleadas. Por ello este indicador no se ha considerado representativo del error. se han considerado representativos.

Error del UAV respecto al TLS en el área de estudio

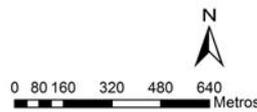
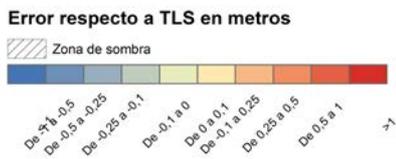
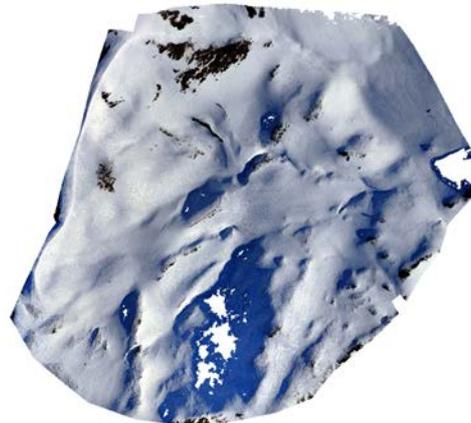
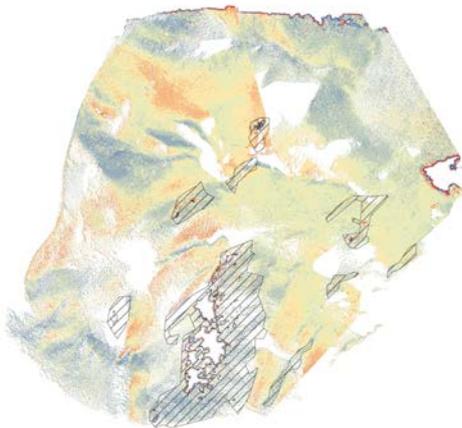
Imagen RGB nadir de la nube de puntos



Vuelo nº 2: Realizado a las 16:00 el día 21/2/2019.
Sombras topográficas ligadas al caso

Error del UAV respecto al TLS en el área de estudio

Imagen RGB nadir de la nube de puntos



Vuelo nº 4: Realizado a las 8:00 el día 22/2/2019.
Sombras topográficas ligadas al amanecer

Figura 9: Error respecto a TLS en las zonas iluminadas y de sombras en los vuelos 2 y 4

5.2. Modelos de espesor de nieve

Se ha generado un mapa de espesor de nieve en el área de estudio a partir de la nube de puntos más densa que se ha obtenido en la campaña del 21 y 22 de febrero de 2019 (Vuelo nº1). Se ha generado a partir del cálculo de la distancia entre los puntos de la nube de puntos y una superficie generada a partir de la nube de puntos del vuelo LiDAR del IGN realizado en 2010 sin presencia de nieve. Posteriormente el resultado se ha rasterizado a 1 metro de resolución para conseguir una mejor visualización y presentación. En la figura 9 podemos ver como se distribuye el espesor de la nieve en la cuenca. Los valores de espesor por debajo de 0 han sido eliminados ya que son considerados como erróneos. Estos valores están debidos a la incertidumbre asociada a las metodologías: El LiDAR aéreo cuenta con 20 cm de incertidumbre a los que hay que sumarle los 5-10 con los que cuenta el dispositivo UAV. El modelo que observamos en la imagen X (excluyendo los valores por debajo de 0) muestra un espesor medio de 1,08 m y un espesor máximo de 6,08 m. A simple vista podemos identificar los patrones espaciales que sigue la acumulación de nieve en nuestra área de estudio. Los mayores valores de acumulación aparecen en cornisas y vaguadas en las que podemos encontrar valores de entre 4 y 6 m de espesor de nieve mientras que los valores más bajos parecen a las laderas de pendientes acuciadas y a convexidades del terreno llegando en algunos casos a aflorar el suelo. El mapa que aparece en la figura 10 es un modelo ráster a 1 m de resolución de la acumulación de la nieve en la cuenca.

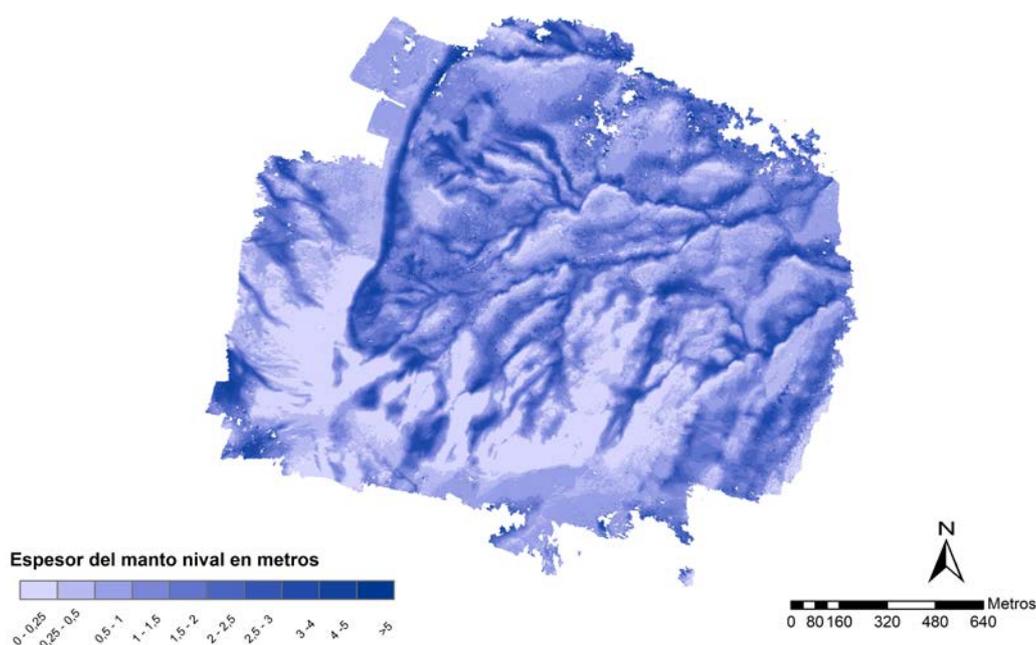


Figura 10: Modelo de nieve del área de estudio

Una de las principales ventajas que los dispositivos UAV presentan respecto al láser escáner terrestre es la visión que tiene del área de estudio. La tecnología de láser escáner, al encontrarse fijo en el suelo únicamente recoge datos de su línea de visión, es decir, existen limitaciones visuales en función su posición. La complicada topografía que presentan las zonas de montaña limita considerablemente la línea visión del dispositivo y, por tanto, limita también la cantidad de datos que podemos obtener del área de estudio. En el caso de la cuenca de Izas el láser escáner terrestre toma datos de 86% de la cuenca (Revuelto *et al.* 2014). Sin embargo, la naturaleza aérea de los dispositivos UAV le permite tener una vista nadir del área de estudio dándole la posibilidad de recoger datos en toda el área de estudio independientemente de las barreras topográficas que intervengan en el campo de visión. Este hecho se observa perfectamente en la imagen X, la cual, muestra una comparación de mapas de nieve obtenidos a partir de una y otra metodología.

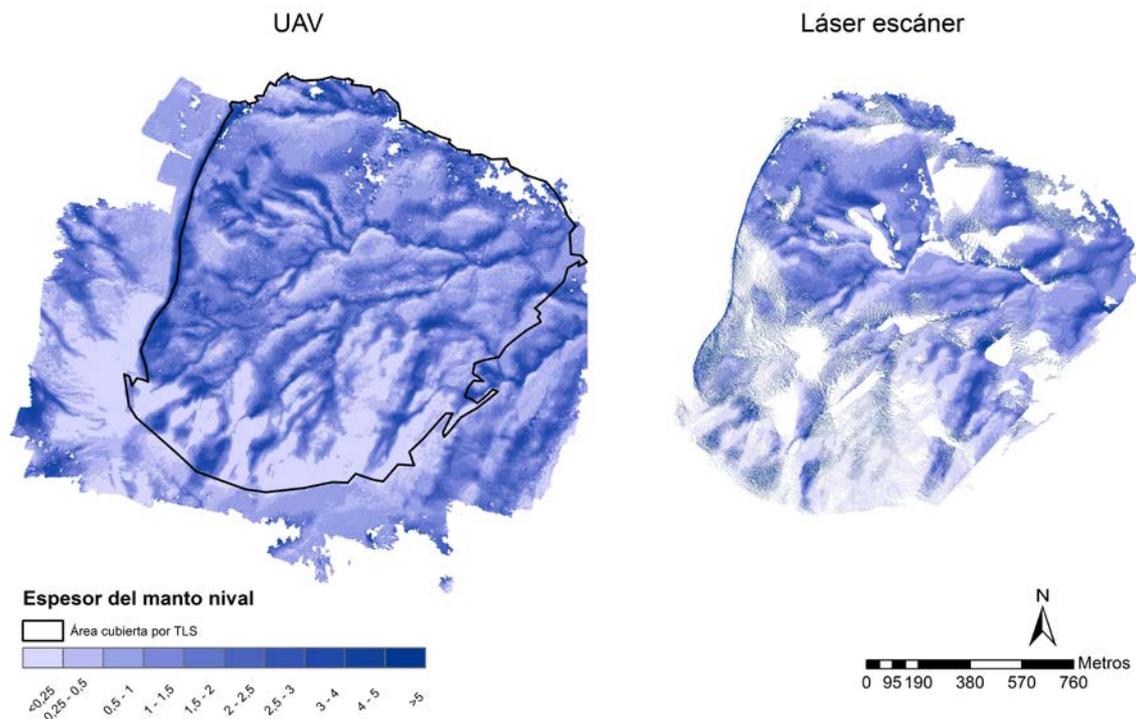


Figura 11: Comparación de los mapas de nieve obtenidos mediante UAV y mediante TLS

5.3. Distribución espacial de la nieve en relación con la topografía del área de estudio

Como se puede observar en los modelos que se han generado en este trabajo, en entornos de alta montaña el manto nival presenta una variabilidad muy elevada (Anderton *et al.* 2004) debido a la complejidad topográfica llegando a variar metros de profundidad en escasos decímetros (Erikson and Williams 2005). Por ello, para cuantificar la relación existente

entre las diferentes variables topográficas y el espesor del manto nival se ha establecido una correlación entre los principales rasgos topográficos y el espesor del manto.

Los rasgos seleccionados son el TPI (Topographic Position Index), la pendiente y la curvatura del terreno. La tabla X muestra los valores de correlación entre estas características del terreno y el espesor del manto nival calculada a partir de la extracción de 500 puntos aleatorios idénticos en todos los modelos.

Tabla 4: Valores de correlación entre las variables topográficas y el espesor del manto nival

CURVATURA	TPI	PENDIENTE	RADIACIÓN POTENCIAL	ALTITUD
-0,15	-0,6	0,03	0,31	-0,26

Se observa en la tabla 4 que los valores de correlación bajos para todas las variables. El valor más elevado (0,6) es el TPI. Esto era de esperar ya que la acumulación en las vaguadas denotaba una mayor influencia de esta variable. A este valor le siguen la radiación potencial y la altitud ya con valores muy bajos de correlación, 0,31 y -0,26 respectivamente. Les sigue de cerca la curvatura con -0,15 y muy por debajo encontramos en último lugar respecto a correlación a la pendiente con un valor de 0,03.

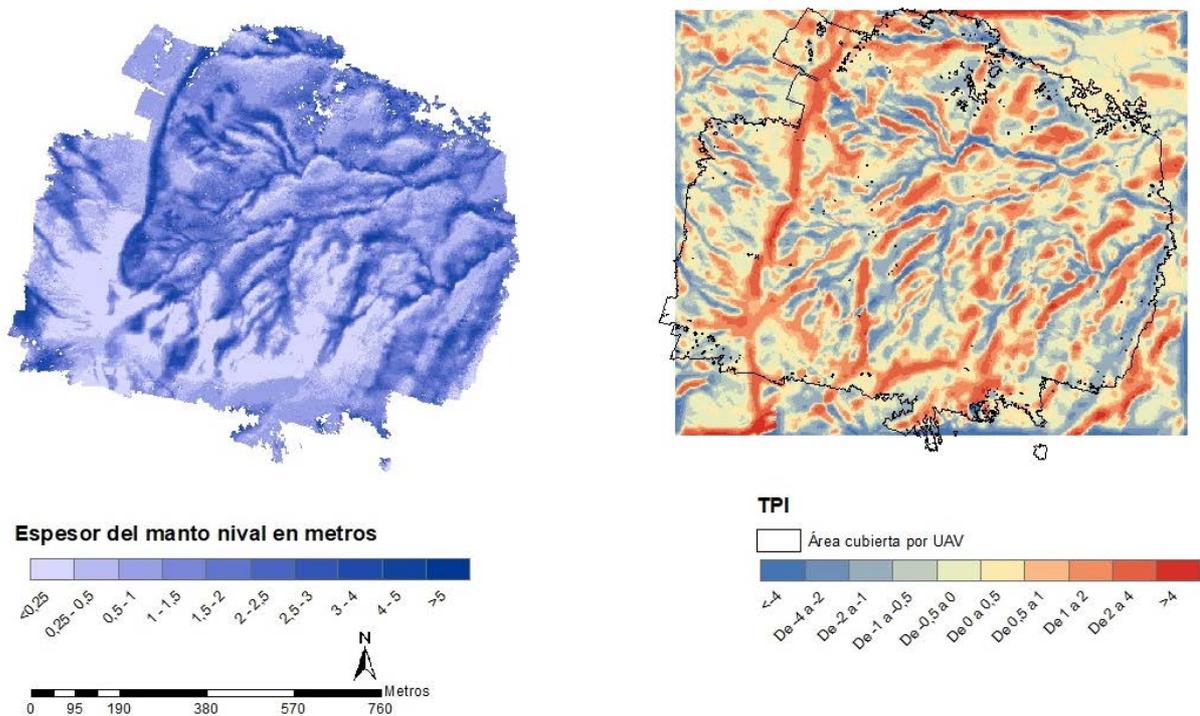


Figura 12: Cartografía de relación entre el espesor del manto nival y los valores de TPI

Se deja ver cierta influencia del valor de correlación negativo de TPI en la distribución de la nieve ya que encontramos valores más altos de acumulación en las zonas de con TPI más bajos. Topográficamente esto se traduce en una mayor acumulación en las concavidades y vaguadas de la cuenca. Este resultado se puede visualizar en la figura número 12.

Otro claro patrón de acumulación en la cuenca que ya comentó Revuelto *et al.* (2017) es un mayor espesor del manto nival en las laderas de orientación sur. Esto está debido principalmente al transporte eólico de la nieve. El viento dominante en la cuenca es de dirección NW-SE (López-Moreno *et al.* 2012), provocando un barrido de la nieve de las laderas de orientación norte, barlovento en este caso, y depositándola en las laderas orientación sur-sureste, de sotavento. Esto es la causa de que en esa cornisa de transición ladera Norte-Sur encontremos los máximos de acumulación en el área de estudio. Esta tendencia espacial se observa claramente en la figura 13, que permite la visualización de las consecuencias del transporte eólico en el espesor del manto nival.

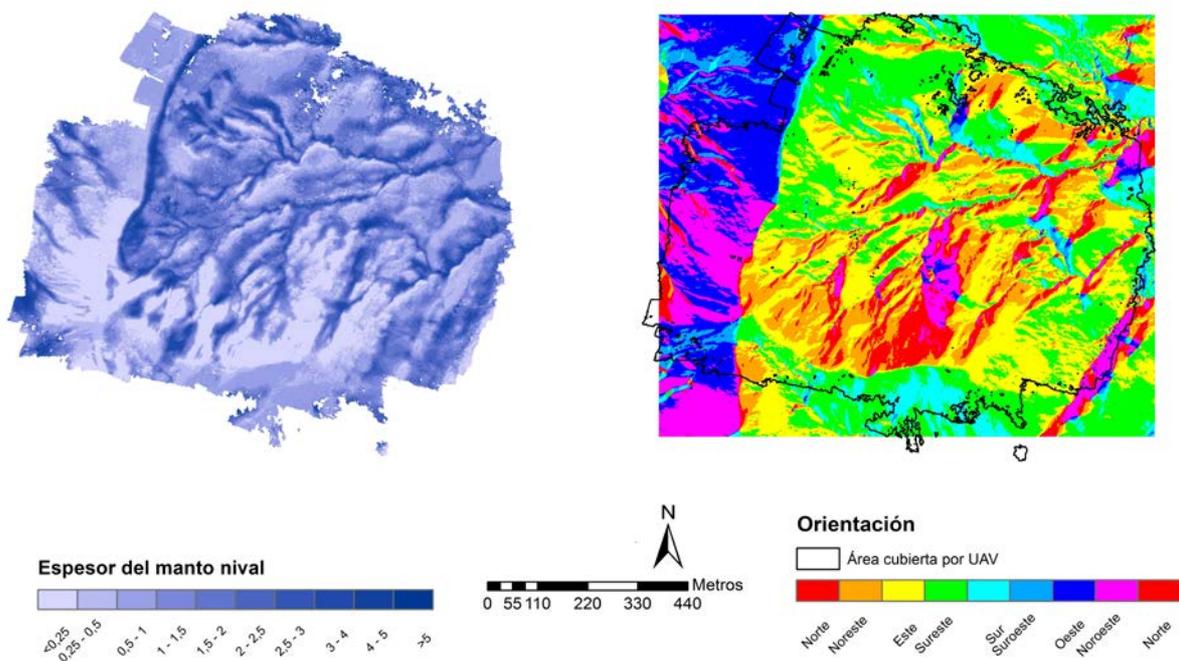


Figura 13: Relación entre la acumulación de nieve y la orientación de las laderas.

6. DISCUSIÓN

Analizando los resultados, el dispositivo UAV ha demostrado ser un método preciso y bastante fiable. Teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a ambas metodologías los errores medios alrededor de 20 cm respecto a los productos de TLS (-0,01m en el mejor de los vuelos)

son un resultado más que aceptable para validar la precisión de esta metodología a escala detalle.

Dado que la variabilidad espacial del manto nival es muy elevada (Erikson and Williams 2005), la alta resolución espacial que ha demostrado el dispositivo UAV permite capturar los cambios de espesor en distancias reducidas. Si se tiene en cuenta que la densidad de la nieve presenta una variabilidad espacial mucho menor que el espesor (López-Moreno *et al.* 2013), tomando algunas medidas puntuales de esta variable podemos obtener el valor del total de agua acumulada en la cuenca con gran precisión a una resolución temporal alta.

Además, las condiciones de acceso de los dispositivos UAV son mucho mejores que otras metodologías. Su escaso peso (2-3kg el dispositivo UAV frente a los más de 40kg del láser escáner) y su autonomía permiten obtener datos de zonas remotas que para otras metodologías serían imposibles. Este hecho en zonas de montaña con fuertes pendientes y presencia de nieve supone una ventaja comparativa muy grande frente a otras metodologías ya que reduce el riesgo al que se exponen los investigadores y facilita considerablemente el trabajo de campo.

Además de los buenos resultados de la precisión en la medición vertical, hay que los excelentes resultados en la georreferenciación de las imágenes y de los modelos con errores del orden de los 2 cm en la horizontal y 3 cm en la vertical. Es necesario especificar que este error en la georreferenciación es un error teórico que posiblemente varíe bajo algunas condiciones.

Respecto a la influencia de las condiciones de iluminación en los productos derivados de las imágenes del UAV cabe destacar las grandes lagunas de datos en las zonas donde la iluminación es deficiente. Esto evidencia la deficiencia y casi incapacidad que presentan los algoritmos SfM para detectar puntos comunes entre las diferentes fotografías tomadas por el dispositivo UAV en las zonas de sombra. Por lo tanto, a la hora de planificar campañas de adquisición de datos es esencial contar con unas buenas condiciones de iluminación sobre el área de estudio. Para ello es recomendable realizar los vuelos en horas cercanas al zenit solar para evitar la aparición de sombras topográficas.

Los resultados obtenidos en la medición de espesores de nieve son aceptables. Al no haber fundido completamente el manto nival antes del análisis de los resultados ha sido necesario utilizar una nube de puntos del LiDAR del IGN. Esto hecho aumenta considerablemente la incertidumbre. Así que si tenemos en cuenta los 20 cm de margen de

error del modelo LiDAR del IGN y los 5-10 cm asociados al UAV contamos con 25-30 cm de incertidumbre. La mayoría de los valores por debajo de 0 cm que encontramos en el mapa de espesor de nieve que hemos generado en este trabajo entran en este margen de error. Además, los valores obtenidos son coherentes tanto en cantidad como en distribución respecto a los resultados obtenidos en estudios previos en la misma área de estudio (Revuelto *et al.* 2013, 2014, 2017). Para enmarcar los valores de espesor obtenidos en el contexto de años anteriores se ha realizado la tabla 5 que recoge tanto el espesor medio como el máximo del manto nival de años anteriores en la cuenca de Izas en fechas similares recogidos en Revuelto *et al.* (2017).

Tabla 5: *Espesor medio y máximo del manto nival en la cuenca de Izas desde 2012*

AÑO	ESPEJOR MEDIO	ESPEJOR MÁXIMO
2012 (22/2)	0,46 m	5,53 m
2013 (17/2)	2,91 m	10,89 m
2014 (22/2)	2,56 m	10,47 m
2015 (26/1)	0,74 m	4,88 m
2016 (4/2)	0,82 m	6,20 m
2017 (20/1)	1,26 m	6,33 m
2019 (21/2)	1,08 m	6,08 m

Los valores de correlación obtenidos entre el espesor del manto nival y las variables topográficas se encuentran por debajo de los obtenidos en investigaciones anteriores. En Revuelto *et al.* (2014) encontramos valores de los años 2012, el cual fue un año similar a 2019 en cuanto a cantidad de nieve y 2013. Respecto al TPI (Variable con mayor correlación), en esta campaña el valor de correlación se encuentra en -0,6 (22/2) frente al -0,7 (22/2) de 2012 y -0,78(17/2) de 2013. En curvatura la diferencia es aún mayor. En la campaña de 2019 el valor de correlación es de 0,15(21/2), en 2012 0,10(22/2) y 0,29(17/2) en 2013. De las demás variables no se dispone de datos de años anteriores para estas fechas.

Como se puede, los valores obtenidos (exceptuando TPI) no son representativos para explicar la distribución del manto de nieve en el área de estudio en esta campaña. La principal causa de estas diferencias se encuentra en que a pesar de que la campaña de adquisición de datos se realizó a finales de febrero, el manto nival y su estructura estaban todavía en formación, por lo que el peso de las variables topográficas en la distribución de la nieve en el área de estudio es menor del que debería.

A través de este trabajo he podido observar que además de la iluminación existen otras fuentes de error que ponen el punto negativo a esta metodología. Se han observado ciertos patrones de error en las zonas relativas a cambios bruscos de pendiente. Por ello, creo que debería ser objeto de estudio para futuros trabajos acerca del tema.

Otra fuente de error que puede ser determinante es el viento. Las rachas de viento pueden provocar oscilaciones en el dispositivo que modifique el solape de las fotografías adquiridas. Cuantificar la influencia que el viento tiene en los productos finales es un tema a tener en cuenta también para futuros estudios.

7. CONCLUSIÓN

La fotogrametría aplicada a imágenes RGB con dispositivo UAV ha demostrado ser una metodología de gran utilidad, especialmente en entornos de montaña. Su elevada precisión nos permite un estudio del manto nival a escala detalle a una resolución espacial sin precedentes. Además, su naturaleza aérea le permite una continuidad espacial de los datos que está fuera del alcance de la gran parte de las metodologías, exceptuando el láser escáner aéreo, pero con una resolución temporal mucho menor que los dispositivos UAV.

A través de este trabajo ha quedado demostrado la gran influencia que la iluminación tiene en las nubes de puntos derivadas ya que en zonas de sombra el software tiene serios problemas en encontrar puntos comunes. Esto se traduce en ausencia de datos en una gran proporción de la superficie en sombra. Por tanto, para optimizar la precisión del dispositivo UAV se recomienda el realizar las campañas de UAV cuando el área de estudio este plenamente iluminada. En zonas de montaña se recomienda en horas cercanas al Zenith solar ya que así reducimos la posibilidad de que haya sombras topográficas en nuestra área de estudio. Sin embargo, una mala iluminación no es la única fuente de error. Durante la realización del trabajo se han observado ciertos patrones de error en las zonas de cambios bruscos de pendiente. Esto, sumado a la influencia del viento debería ser objeto de estudio para trabajos futuros.

En este trabajo hemos observado una influencia menor de la esperada de las variables topográficas en el espesor del manto nival. Sólo parecen representativos los valores negativos de correlación del TPI que indican una mayor acumulación en las concavidades de la cuenca. También se han encontrado patrones visuales que denotan que el viento dominante Noroeste –

Sureste tiene influencia en la acumulación de nieve en las laderas sur-sureste llegando a encontrar espesores superiores a los 5 m.

A pesar de que aún sea una metodología en desarrollo y cuente con puntos de mejora, los dispositivos UAV son una solución eficaz para el estudio y monitorización del manto nival a escala detalle en entornos de alta montaña.

A modo de cierre he realizado una tabla de grandes ventajas y puntos débiles de esta metodología en zonas de alta montaña.

Tabla 6: Fortalezas y debilidades del UAV en entornos de alta montaña

FORTALEZAS	DEBILIDADES
Precisión centimétrica de los productos	Sujeto a condiciones meteorológicas y de iluminación favorables
Resolución temporal alta	Requiere una capacidad computacional elevada
Escaso peso del dispositivo y facilidad de transporte. Esto es de gran valor en zonas de montaña	Alto coste del equipamiento
Capaz de abarcar grandes áreas de estudio	Posibles fallos mecánicos por el frío (especialmente de las baterías)
Continuidad espacial de la información (Bühler <i>et al.</i> 2016)	
Modelos 3D en RGB que permiten distinguir zonas de nieve/no nieve (Nolan <i>et al.</i> 2015) y en el caso de este estudio zonas de sol/sombra	
Vista Nadir	

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alvera, B. (2000) La cuenca experimental de Izas, Pirineo aragonés. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 26, 9-21.
- Avanzi, F., Bianchi, A., Cina, A., De Michele, C., Maschio, P., Pagliari, D., Pasoni, D., Pinto, L., Piras, M. & Rossi, L. (2018). Centimetric accuracy in snow depth using unmanned

- aerial system photogrammetry and a multistation. *Remote Sensing*, 10(5), 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs10050765>
- Bavay, M., & Grünewald, T. (2012). Response of snow cover and runoff to climate change in high Alpine catchments of Eastern Switzerland. *Advances in water resources*, 55, 4–16.
- Bhardwaj, A., Sam, L., Akanksha, Martín-Torres, F. J., & Kumar, R. (2016). UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects. *Remote Sensing of Environment*, 175, 196–204. doi:10.1016/j.rse.2015.12.029
- Bühler, Y., Adams, M. S., Bösch, R., & Stoffel, A. (2016). Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UAS): potential and limitations. *The Cryosphere Discussions*, (January), 1–36. <https://doi.org/10.5194/tc-2015-220>
- Bühler, Y., Marty, M., Egli, L., Veitinger, J., Jonas, T., Thee, P., & Ginzler, C. (2015). Snow depth mapping in high-alpine catchments using digital photogrammetry. *Cryosphere*, 9(1), 229–243. <https://doi.org/10.5194/tc-9-229-2015>
- CloudCompare (2.10.2 [software] 2019
- De Michele, C., Avanzi, F., Passoni, D., Barzaghi, R., Pinto, L., Dosso, P., Ghezzi, A., Gianatti, R. & Vedova, G. Della. (2016). Using a fixed-wing UAS to map snow depth distribution: An evaluation at peak accumulation. *Cryosphere*, 10(2), 511–522. <https://doi.org/10.5194/tc-10-511-2016>
- De Reu, J., Bourgeois, J., Bats, M., Zwertvaegher, A., Gelorini, V., De Smedt, P., Chu, W., Antrop, M., De Maeyer, P., Finker, P., Van Meirvenne, M., Verniers, J. & Crombé, P. (2013). Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology*, 186, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.015>
- Deems, J. S., Painter, T. H., & Finnegan, D. C. (2013). Lidar measurement of snow depth : A review. *Journal of glaciology*, 59, 467–479. <https://doi.org/10.3189/2013JoG12J154>
- Elsasser, H., & Abegg, B. (11/9/2003). *Climate Change - Impacts on the Tourism Industry in Mountain Areas*. Trabajo presentado en 1st international conference of climate change and tourism, Djerba.
- Erickson, T. A., Williams, M. W., & Winstral, A. (2005). Persistence of topographic controls on the spatial distribution of snow in rugged mountain terrain , Colorado , United States. *Water resources research*, 41, 1–17. <https://doi.org/10.1029/2003WR002973>

- Faulkner Burkhart, J., Kylling, A., Schaaf, C. B., Wang, Z., Bogren, W., Storvold, R., Solbo, S., Pedersen, C.A. & Gerland, S. (2017). Unmanned aerial system nadir reflectance and MODIS nadir BRDF-adjusted surface reflectances intercompared over Greenland. *Cryosphere*, *11*(4), 1575–1589. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1575-2017>
- Fernandes, R., Prevost, C., Canisius, F., Leblanc, S. G., Maloley, M., Oakes, S., Holman, K. & Knudby, A. (2018). Monitoring snow depth change across a range of landscapes with ephemeral snow packs using Structure from Motion applied to lightweight unmanned aerial vehicle videos. *The Cryosphere Discussions*, *2*, 1–39. <https://doi.org/10.5194/tc-2018-82>
- Frei, A., Tedesco, M., Lee, S., Foster, J., Hall, D. K., Kelly, R., & Robinson, D. A. (2012). A review of global satellite-derived snow products. *Advances in Space Research*, *50*(8), 1007–1029. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.12.021>
- Furukawa, Y., Sethi, A., Ponce, J., & Kriegman, D. (2010). Structure and Motion from Images of Smooth Textureless Objects, *Lecture notes in Computer Science* 287–298. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24671-8_23
- Gascoin, S., Grizonnet, M., Bouchet, M., Salgues, G., & Hagolle, O. (2019). Theia Snow collection: High-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Earth System Science Data*, *11*(2), 493–514. <https://doi.org/10.5194/essd-11-493-2019>
- Guillot, B., & Pouget, F. (2015). UAV application in coastal environment, example of the oleron island for dunes and dikes survey. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *40*(3W3), 321–326. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-321-2015>
- Gurtner, W., & Estey, L. (2007). RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11. *Astronomical Institute, University of Berne* and UNAVCO, Boulder, Colorado, 2007
- Haefner, H., Seidel, K., & Ehrlér, H. (1997). Applications of snow cover mapping in high mountain regions. *Physics and Chemistry of the Earth*, *22*(3–4), 275–278. [https://doi.org/10.1016/S0079-1946\(97\)00143-2](https://doi.org/10.1016/S0079-1946(97)00143-2)
- ESRI ArcGIS (10.3 [software] 2014.)
- Immerzeel, W. W., Kraaijenbrink, P. D. A., Shea, J. M., Shrestha, A. B., Pellicciotti, F.,

- Bierkens, M. F. P., & De Jong, S. M. (2014). High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing of Environment*, *150*, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.025>
- James, M. R., & Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *117*(3), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2011JF002289>
- Lana-Renault, N., Alvera, B., & García-Ruiz, J. M. (2010). The snowmelt period in a mediterranean high mountain catchment: Runoff and sediment transport. *Cuadernos de Investigacion Geografica*, *36*(2), 99–108. <https://doi.org/10.18172/cig.1240>
- LiDAR PNOA, 2010: Instituto Geográfico Nacional [consultado el 8/3 de 2019] disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es>
- López-Moreno, J. I., & García-Ruiz, J. M. (2005). 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. *Hydrological Sciences Journal*, *49*(5). <https://doi.org/10.1623/hysj.49.5.787.55135>
- López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Revuelto, J., & Vicente-Serrano, S. M. (2012). Response of snow processes to climate change: spatial variability in a small basin in the Spanish Pyrenees. *Hydrological Processes*, *27*(18), 2637–2650. doi:10.1002/hyp.9408
- López-Moreno, Juan I., Revuelto, J., Alonso-González, E., Sanmiguel-Vallelado, A., Fassnacht, S. R., Deems, J., & Morán-Tejeda, E. (2017). Using very long-range terrestrial laser scanner to analyze the temporal consistency of the snowpack distribution in a high mountain environment. *Journal of Mountain Science*, *14*(5), 823–842. <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4086-0>
- Lowe, D., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, *60*, 91–110
- Marty, C. (2014). Regime shift of snow days in Switzerland Regime shift of snow days in Switzerland, *Geophysical research letters*, *35*, 1-5 . <https://doi.org/10.1029/2008GL033998>
- Mauro, B. Di, Fava, F., Ferrero, L., Garzonio, R., Baccolo, G., Delmonte, B., & Colombo, R. (2015) Mineral dust impact in radiative properties. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, *120*, 6080-6097. <https://doi.org/10.1002/2015JD023287>.Received

- Nolan, M., Larsen, C. F., & Sturm, M. (2015). Mapping snow-depth from manned-aircraft on landscape scales at centimeter resolution using Structure-from-Motion photogrammetry. *The Cryosphere Discussions*, 9(1), 333–381. <https://doi.org/10.5194/tcd-9-333-2015>
- Petrie, G., & Toth, C. (2009). Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning. *Topographic Laser Ranging and Scanning*, 1–28. <https://doi.org/10.1201/9781420051438.ch1>
- Pix4d S.A. Pix4D Mapper(4.0 [software] 2018
- Pomeroy, J. W. (2007). The CRHM model: a platform for basin process representation and model structure on physical evidence. *Hydrological Processes*, 21. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Prokop, A. (2009). Terrestrial laser scanning for snow depth observations: An update on technical developments and applications. *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Davos, Switzerland*, 192–196.
- Prokop, A., Schirmer, M., Rub, M., Lehning, M., & Stocker, M. (2008). A comparison of measurement methods: Terrestrial laser scanning, tachymetry and snow probing for the determination of the spatial snow-depth distribution on slopes. *Annals of Glaciology*, 49, 210–216. <https://doi.org/10.3189/172756408787814726>
- Ramsay, B. H. (1998). The interactive multisensor snow and ice mapping system. *Hydrological Processes*, 12(10–11), 1537–1546. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199808/09\)12:10/11<1537::AID-HYP679>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11<1537::AID-HYP679>3.0.CO;2-A)
- Revuelto, J., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., & Vicente-Serrano, S. M. (2014). Topographic control of snowpack distribution in a small catchment in the central Spanish Pyrenees: Intra- and inter-annual persistence. *Cryosphere*, 8(5), 1989–2006. <https://doi.org/10.5194/tc-8-1989-2014>
- Revuelto, J., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., Zabalza, J., Arguedas, G., & Vicente-Serrano, S. M. (2014). Mapping the annual evolution of snow depth in a small catchment in the Pyrenees using the long-range terrestrial laser scanning. *Journal of Maps*, 10(3), 379–393. <https://doi.org/10.1080/17445647.2013.869268>
- Revuelto, J., Azorin-Molina, C., Alonso-González, E., Sanmiguel-Valladolid, A., Navarro-Serrano, F., Rico, I., & Ignacio López-Moreno, J. (2017). Meteorological and snow distribution data in the Izas Experimental Catchment (Spanish Pyrenees) from 2011 to

2017. *Earth System Science Data*, 9(2), 993–1005. <https://doi.org/10.5194/essd-9-993-2017>
- Revuelto, J. López Moreno, J.I., Azorín-Molina, C., Vicente, S. (2013). Distribución espacial del manto de nieve en una cuenca del Pirineo central en relación con la topografía. Persistencia Intra- e Interanual. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Serie A9*, 717-728
- Rinex ARAGEA. [Consultado: 12/3/2019] disponibles en: <https://gnss.aragon.es/>
- Sensefly S.A. EMotion 2.7 user manual revision 2.1, 2018. 115-125
- Schonberger, J. L., & Frahm, J. M. (2016). Structure-from-Motion Revisited. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016-Decem*, 4104–4113. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445>
- Snavely, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2008). Modeling the world from Internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189–210. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>
- Stempfhuber, W., & Buchholz, M. (2012). a Precise, Low-Cost Rtk Gnss System for Uav Applications. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(1), 289–293. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxviii-1-c22-289-2011>
- Tonkin, T. N., & Midgley, N. G. (2016). Ground-control networks for image based surface reconstruction: An investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing*, 8(9), 16–19. <https://doi.org/10.3390/rs8090786>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>