



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Nieve y polvo sahariano en el Pirineo: análisis en la
fusión por impurezas

Snow and Saharian dust in the Pyrenees: analisis in
fusion impurities

Autor

Diego Ascaso Javierre

Director/es

Miguel Ángel Saz Sánchez

Facultad de Filosofía y Letras
Septiembre 2019

Resumen

El cambio climático trae unas consecuencias de reducción de las precipitaciones, subida de las temperaturas, mayor frecuencia de los fenómenos extremos y desertificación, entre otros. La nieve es un recurso hídrico en los ecosistemas de montaña, muchos de ellos completamente dependientes de ella. En el Pirineo, lugar de localización del presente estudio, las proyecciones no son mejores sino que se enfrenta a una fuerte reducción de las precipitaciones en las próximas décadas, lo que repercutirá no solo en el medio ambiente, sino en todo un sector económico dependiente de las condiciones climatológicas. A ello se le suma la aparición de impurezas en la nieve, como el polvo sahariano, el cual es el objeto del proyecto. Las mediciones de albedo, temperatura y densidad en la Cuenca Experimental de Izas (coordinada por el Instituto Pirenaico de Ecología), han servido para representar de buena manera la influencia de esta impureza en los procesos de fusión. Conociendo la aceleración de la fusión, la Administración puede prevenir los efectos provocados por el rápido deshielo y, así, minimizar los posibles daños.

Palabras clave: *albedo, nieve, polvo sahariano, fusión y Pirineos.*

Abstract

Climate change entails a series of consequences of decline in rainfall, temperatures increase, higher frequency of extreme weather events and desertification among others. The snow is a water resource in mountain ecosystems, many of them being completely dependent on it. In the Pyrenees, which is the location of the present study, the projections are not better but they face a sharp reduction in rainfall in the next decades, which will affect not only the environment but also a whole economic sector dependent on weather conditions. It must be added the appearance of impurities in the snow, such as Saharan dust, which is the subject of the project. The measurements of albedo, temperature and density in the Experimental Catchment of Izas (coordinated by Instituto Pirenaico de Ecología) have allowed a good representation of the impurity influence in the snowmelt process. Knowing the fusion acceleration, the Administration can prevent the effects caused by the rapid thawing and, in that way, minimise the possible damages.

Keywords: *albedo, snow, Saharan dust, snowmelt and Pyrenees.*

Índice

1.	Introducción.....	1
1.1	Importancia del tema.....	2
1.1.1.	Recurso hídrico	2
1.1.2.	Ecosistemas.....	3
1.1.3.	Riesgo natural	5
1.1.4.	Interés socioeconómico en Aragón	6
1.2.	Aportaciones del trabajo y zona de estudio	8
1.2.1.	Zona de estudio	9
2.	Datos y métodos	12
2.1.	Objetivos.....	12
2.2.	Metodología	13
2.3.	Seguimiento de las parcelas	17
2.4.	Medición de albedo in situ.....	21
2.5.	Empleo de datos continuos de temperatura, albedo y espesor de nieve.....	22
2.6.	Condiciones nivo-meteorológicas invierno-primavera 2018 e impacto en el plan de trabajo.....	23
3.	Resultados	25
4.	Discusión de los resultados	35
4.1.	Cumplimiento de objetivos.....	36
5.	Conclusiones.....	39
6.	Bibliografía.....	41

Figura 1 Superficie agrícola por provincias y tipo de cultivo. Fuente: INE. Elaboración propia.....	2
Figura 2 Reserva de nieve en el Pirineo sobre la cuenca del Ebro a día 1 de abril de 2018. En rojo el año 2018, en azul 2017 y en gris la media de los últimos 5 años. Fuente: https://opcc-ctp.org/es/noticia/una-capa-nieve-particularmente-notable-en-pirineos	3
Figura 3 Imagen ejemplo sobre la nieve rosa. Fuente: https://www.lugaresdenieve.com/?q=es/reportaje/nieve-rosa-existe	4
Figura 4 Zona de soliflucción en Astún (Huesca). Elaboración propia	5
Figura 5 Alud de placa. Fuente: https://montanasegura.com/tipos-de-aludes1/	5
Figura 6 Evolución de la ocupación de todo tipo de alojamientos turísticos en Aragón y en el Pirineo. Fuente: IAEST. Elaboración propia.	7
Figura 7 Imagen de una nube de polvo envolviendo una granja en EEUU en 1930. Fuente: https://www.livescience.com/4915-1930s-dust-bowl-bad.html	8
Figura 8 Imagen de la Cuenca Experimental de Izas con algunos de los instrumentos. Elaboración propia	9
Figura 9 Climograma que representa las características la zona de estudio Elaboración propia.....	10
Figura 10 Mapa de localización del área de estudio. Elaboración propia	11
Figura 11: Esquema de las acciones llevadas a cabo para desarrollar el proyecto. Elaboración propia	13
Figura 12: Esparcimiento de las impurezas sobre la nieve. Fuente: IPE	14
Figura 13: Vista general de la zona de estudio. Fuente: IPE	14
Figura 14: Medición de la temperatura del perfil de nieve. Fuente: IPE	15
Figura 15: Extracción de nieve con la cuña. Fuente: IPE.....	15
Figura 16: Pesaje de la cuña con nieve para obtener la densidad. Fuente: IPE	15
Figura 17: Medición del tamaño del grano de nieve. Fuente: IPE.....	16
Figura 18: Secuencia de imágenes de la Cuenca Experimental de Izas. Las imágenes muestran la evolución de los últimos días del manto de nieve en la zona de estudio. Fuente: IPE.....	17
Figura 19: Imagen del Plot 4 el día 31/01/2018 Fuente: IPE	18
Figura 20: Imagen del Plot 6 el día 4/05/2018 Fuente: IPE	19
Figura 21: Imagen del Plot 1 el día 14/05/2018 Fuente: IPE	20
Figura 22: Imagen del Plot 1 el día 29/05/2018 Fuente: IPE	21
Figura 23: Medición del albedo in situ el día 14/05/2018 Fuente: IPE.....	22
Figura 24: Secuencia de imágenes que muestran la evolución de la nube de polvo sahariano del evento del 6 de abril de 2018. Fuente: Barcelona Dust Forecast Center	23
Figura 25 Perfil de nieve realizado el día 31 de enero	25
Figura 26 Perfil de nieve realizado el 23 de febrero	26
Figura 27 Perfil de nieve realizado el 4 de mayo.....	26
Figura 28 Perfil de nieve realizado el 14 de mayo.....	27
Figura 29 Perfil de nieve realizado el 29 de mayo.....	27
Figura 30 Densidad de los perfiles de nieve realizados el 31 de enero.....	28
Figura 31 Densidad de los perfiles de nieve realizados el 23 de febrero	29
Figura 32 Densidad de los perfiles de nieve realizados el 4 de mayo.....	29
Figura 33 Densidad de los perfiles de nieve realizados el 14 de mayo.....	30
Figura 34 Densidad de los perfiles de nieve realizados el 29 de mayo.....	30
Figura 35 Secuencia de imágenes de la Cuenca Experimental de Izas que muestra la aparición del polvo sahariano. Fuente: IPE	31
Figura 36 Evolución del espesor de la columna de nieve en relación al albedo.....	32
Figura 37 Relación entre la temperatura media de mayo y el espesor de nieve	32
Figura 38 Relación entre el albedo y el Degree Day Factor (cm/°C).....	34
Figura 39 Relación entre el albedo y la concentración de polvo en la nieve. Fuente: Oainter et al. (2013).....	35

1. Introducción

La nieve es un recurso hídrico de gran importancia, no solo por la capacidad de ser un reservorio de agua dulce, sino que también tiene interés económico y medioambiental. Económico por el turismo de nieve y medioambiental por formar parte de diferentes ecosistemas.

En la actualidad, el cambio climático está en todos los medios, que a pesar de ello no se toman medidas vinculantes. Este problema, el mayor del siglo XXI se podría afirmar, trae un futuro en el que parece que las regiones del Sur de Europa tendrán serios problemas con la desertificación, como se indica en el nuevo Atlas mundial de la desertificación¹. Expertos prevén que en los próximos 30 años, el espesor de la nieve que precipita en el Pirineo se verá reducido a la mitad². Los glaciares que todavía resisten al aumento de temperaturas, corren la misma suerte y se estima que hayan desaparecido antes de haber finalizado el siglo.

El tema elegido se basa en la influencia de las partículas contaminantes en la fusión de la nieve, y va de la mano con un nuevo proyecto que lleva a cabo el Instituto Pirenaico de Ecología (IPE). Este proyecto es nuevo en la región pirenaica, no así en zonas como los Alpes o las Montañas Rocosas donde llevan años realizando estos trabajos y que también son sensibles a los efectos del cambio global. Las impurezas con las que se comenzó el proyecto eran polvo sahariano, para el estudio de un contaminante de origen natural, y Black Carbon, como contaminante antrópico aunque también puede ser efecto de los incendios forestales y no solo de la quema de combustibles fósiles, como recoge Di Mauro et al. (2015).

El interés del trabajo es importante, ya que en los Pirineos aragoneses, este recurso hídrico no solo provee de agua de boca a buena parte de la población y permite la irrigación de las tierras bajas, sino que todo un sector turístico gira en torno a la temporada de esquí, por lo que los resultados obtenidos en el trabajo no solo pueden interesar a la comunidad científica, sino que la Administración puede valerse de ellos para temas relacionados con la evaluación de riesgos naturales.

En cuanto a estudios similares sí que existen, pero ninguno de ellos en el Pirineo, aun así, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica previa al tratamiento de datos para ponerse en situación ante el tema y tener unas nociones mínimas con las comenzar el trabajo. Dicha revisión ha facilitado la recopilación de datos, su gestión e interpretación y la representación de los mismos con el fin de obtener unos resultados óptimos y accesibles a todas aquellas personas interesadas en el tema.

¹ El nuevo Atlas mundial de la desertificación revela una presión sin precedentes sobre los recursos naturales del planeta. Comisión Europea (2018)

² Consultar: Observatorio Pirenaico del Cambio Climático <https://www.opcc-ctp.org/es/sector/clima-futuro>

1.1 Importancia del tema

En este punto se relaciona el tema con los efectos que tiene la nieve en el entorno más próximo. Se tratan de aspectos socioeconómicos, de riesgos naturales y la importancia en el ecosistema. Para ello se plantean unos objetivos que se trataran de alcanzar, a través de datos recogidos en varias salidas de campo.

1.1.1. Recurso hídrico

La nieve es un recurso hídrico de gran importancia, especialmente en aquellas zonas con un ambiente semidesértico muy próximo, como en la que se sitúa este estudio. La importancia de la nieve, como recurso hídrico en esta zona, radica en la capacidad de garantizar un reservorio, más que importante, de agua para el regadío en el somontano prepirenaico. Solo el sistema de Riegos del Alto Aragón cubre una superficie de más de 130 mil hectáreas de regadío (la mayor superficie irrigada del Sur de Europa), con un interés en llegar a las 174 ha en un corto plazo de tiempo. Toda esta superficie de regadía depende directamente del agua almacenada en los embalses aguas arriba de los ríos del Pirineo, ya que el clima mediterráneo del somontano no aporta las suficientes precipitaciones para el cultivo de especies de regadío. Los embalses se abastecen del agua de lluvia, pero el aporte principal viene de la fusión de la nieve en las cabeceras de los valles, de tal modo que un año rico en nevadas se traduce en un aumento de la capacidad de los embalses y, a su vez, beneficioso para todos los cultivos aguas abajo, garantizando el agua suficiente para su irrigación.

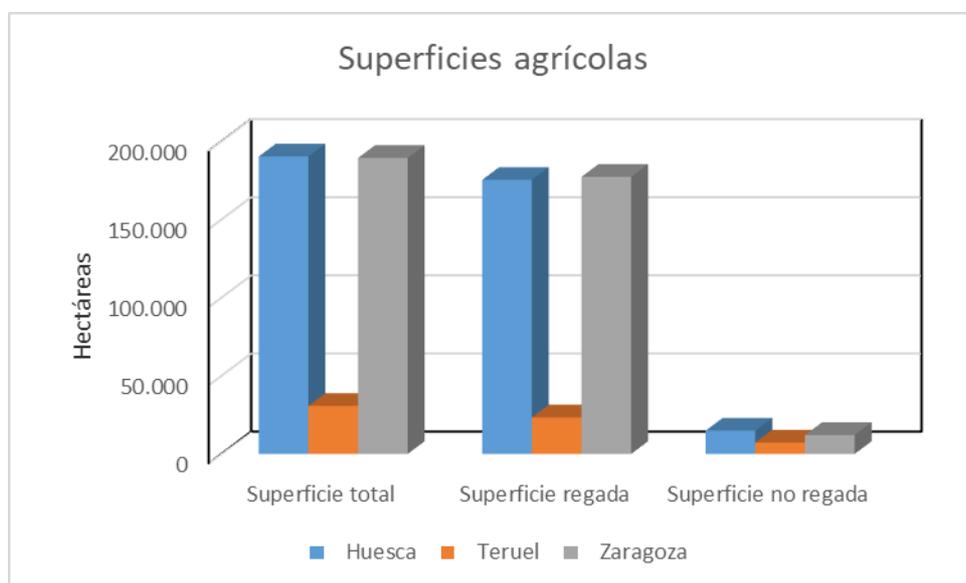


Figura 1 Superficie agrícola por provincias y tipo de cultivo.
Fuente: INE. Elaboración propia

En el Figura 1 se muestra la cantidad de hectáreas con el tipo de cultivo por provincias. Se podría decir que en la provincia de Huesca la práctica totalidad de superficies de regadío se riega con agua procedente del Pirineo, gracias a sus embalses, aunque también hay ríos que no tienen un

régimen pluvio-nival o nivo-pluvial, como el, Flumen, el Alcanadre o el Isuela, que su caudal es mayormente pluvial y sí que son capaces de cubrir una parte de las necesidades de las superficies próximas a su cauce. La provincia de Zaragoza se sirve del río Ebro y su caudal, aunque también utiliza agua procedente de embalses del Pirineo, como puede ser el embalse de Yesa que, además, suministra agua potable a la ciudad.

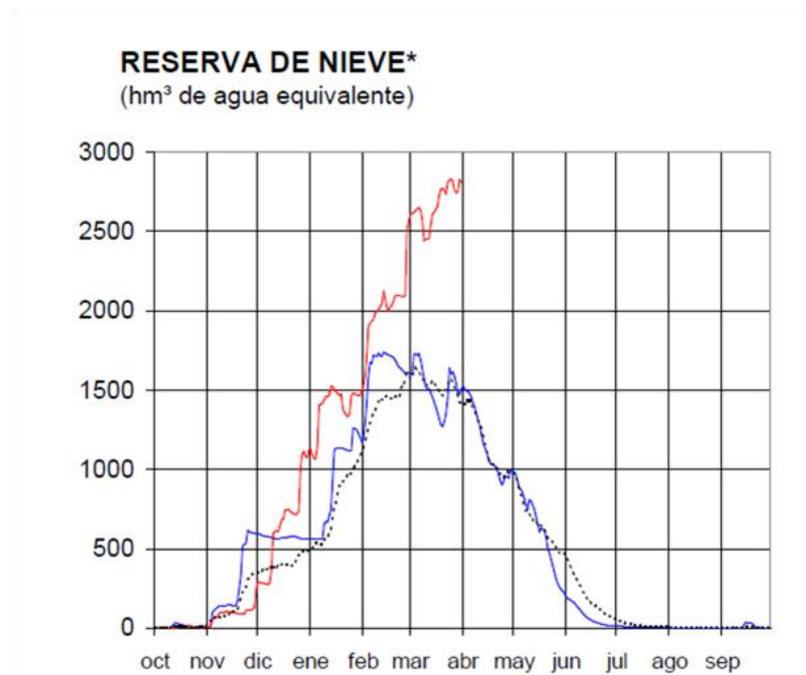


Figura 2 Reserva de nieve en el Pirineo sobre la cuenca del Ebro a día 1 de abril de 2018. En rojo el año 2018, en azul 2017 y en gris la media de los últimos 5 años. Fuente: <https://opcc-ctp.org/es/noticia/una-capa-nieve-particularmente-notable-en-pirineos>

En el Figura 2 se muestra la reserva de nieve equivalente en agua en el Pirineo a fecha 1 de abril de 2018 sobre la cuenca del Ebro. Se observa la gran diferencia en la reserva con respecto al año anterior, lo que demuestra las condiciones excepcionales de este año.

1.1.2. Ecosistemas

Existen tipos de ecosistemas y especies que tienen por hábitat zonas con temperaturas frías y con la existencia continua de nieve. El más representativo es el bioma de la tundra. Este es un ejemplo que no se puede encontrar en nuestra región debido a las latitudes medias en las que se sitúa el estudio y unas temperaturas más altas y prolongadas durante todo el año.

En la zona de estudio, la nieve cubre el terreno durante buena parte del año. Por lo general la cubierta de nieve aparece a comienzos de noviembre y se mantiene hasta mediados o finales de mayo, siempre a merced de las condiciones meteorológicas del año. Durante este periodo de unos 5 ó 6 meses, es común que surja algún tipo de especies que tenga por hábitat la nieve en sí misma,

como se mencionan en el siguiente párrafo, aparte de todas las especies que habitan en el piso subalpino pirenaico, comprendido entre los 1.700 y los 2300 metros sobre el nivel del mar.

La nieve rosa es un fenómeno que se produce por la aparición de un tipo de alga criófila (*Chlamydomonas nivalis*), es decir, que crece en ambientes helados como la nieve o el hielo. Esta alga posee un pigmento de color rojizo, que además de integrarse en la nieve y mostrar un color rosáceo, la protege de los rayos ultravioleta y le facilita la absorción de calor, creando una fina capa de agua líquida a su alrededor. Es en la época de fusión nival, generalmente en primavera, cuando es más fácil encontrar este tipo de nieve, debido a que el agua de fusión, junto con los rayos del sol, provoca la germinación de las esporas enterradas en la nieve. Es posible encontrar este tipo de alga hasta en una profundidad de 25 ó 30 centímetros (Willians et al., 2003).



Figura 3 Imagen ejemplo sobre la nieve rosa.

Fuente: <https://www.lugaresdenieve.com/?q=es/reportaje/nieve-rosa-existe>

Distintas impurezas también pueden tornar la nieve a un color oscuro. Tales impurezas pueden ser el hábitat potencial de ciertos insectos y gusanos cuya dieta suele estar basada en polen y restos de insectos. Su hábitat es la nieve y sus bajas temperaturas, por lo que fuera de ella perecen fácilmente.

Inmediatamente debajo de la columna de nieve, o sea en el suelo, son las plantas herbáceas las que dominan. Especies resistentes al frío y que pasan buena parte del año bajo un espesor considerable de nieve y que, en verano, sirven de pasto para las ganaderías extensivas.

La nieve ejerce de manto protector para la vegetación herbácea en las zonas alpinas, proporcionando refugio frente a las temperaturas muy por debajo de los 0 °C (el espacio entre el suelo y los primeros centímetros de nieve no suele bajar de esta temperatura, manteniéndose estable

mientras dure el manto de nieve). La fusión de la nieve en los meses de mayo a junio también activa los procesos fenológicos en las plantas ocultas por la nieve durante los meses invernales. Estudios como el de Steltzer, Landry, Painter, Anderson y Ayres (2009), analizan el momento en que comienzan los procesos de crecimiento y floración tras la fusión de la nieve, además de como influye en la fenología la existencia de impurezas como las del interés de este mismo trabajo: el polvo desértico. En su artículo *Biological consequences of earlier snowmelt from desert dust deposition in alpine landscapes*, muestran como la existencia de polvo en la acumulación de nieve no solo provoca una fusión más temprana que en la ausencia de nieve, sino que también se adelantan los procesos fenológicos en las parcelas que contenían el polvo.

1.1.3. Riesgo natural

Las avalanchas o aludes son procesos naturales de movimiento de nieve, pero se convierten en un riesgo cuando hay susceptibilidad de provocar daños materiales o personales. Se trata del desplazamiento repentino y a gran velocidad de una masa de nieve, acompañada en ocasiones de derrubios, rocas y otros elementos que encuentra a su paso. Los aludes pueden producirse por:

- Causas internas: Cuando es alterado el equilibrio tensional en la masa helada, perdiéndose la cohesión interna de la nieve y formándose superficies de deslizamiento entre las capas.
- Causas externas o accidentales: debido a vibraciones generadas por la caída de rocas, bloques de nieve o hielo, cornisas, seracs, movimientos sísmicos o por efecto de la actividad humana, especialmente el paso de esquiadores.



Figura 4 Zona de solifluxión en Astún (Huesca).
Elaboración propia.



Figura 5 Alud de placa. Fuente:
<https://montanasegura.com/tipos-de-aludes1/>

La acumulación de nieve en laderas y su posterior fusión puede provocar movimientos de ladera, esto es debido a la saturación de las capas superficiales, que si la pendiente es óptima será capaz de deslizarse y abombar una parte de la ladera. En función de si el deslizamiento tiene causas únicamente pluviales de saturación o responde a efectos del ciclo hielo-deshielo de la nieve, se

denominará como movimiento de soliflucción (Figura 4), en el primer caso, y de geliflucción en el segundo.

El ritmo de fusión de la nieve puede desembocar en un rápido crecimiento de los ríos, que puede provocar inundaciones. La función de las presas como almacenes de agua también sirve para laminar avenidas y evitar riesgos por las inundaciones.

1.1.4. Interés socioeconómico en Aragón

El Observatorio Pirenaico del Cambio Climático plasma en su informe sobre *El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades³ y adaptación* una serie de hechos que ya están afectando al Pirineo: reducción de las precipitaciones de nieve y lluvia a la mitad en los próximos 30 años, aumento de las temperaturas medias, mayor frecuencia de los eventos meteorológicos extremos..., en definitiva, un cambio brusco en las condiciones climáticas que obligará a los sectores a adaptarse a ellas, visto que la reversión de las mismas va a ser prácticamente imposible.

En Aragón y, especialmente, en la provincia de Huesca, el factor del turismo de montaña ha experimentado un importante aumento de visitantes en lo que va de siglo. Las mejoras en los transportes, en los ejes de comunicación, la proyección del entorno a través de las nuevas tecnologías o la aparición de un turismo de interior frente al tradicional de sol y playa, han sido parte de los factores por lo que el Pirineo atrae a grandes cupos de población.

La futura conexión de autovías (prevista para 2021) tras la construcción de la autovía A-22 que conecta Lleida con Huesca y, a su vez la prolongación de la autovía Mudéjar (A-21) hacia Pamplona por el puerto de Monrepós, han hecho del Pirineo central mucho más atractivo por la facilidad, rapidez y comodidad de llegar hasta los valles interiores (45 minutos desde Huesca y 1,5 horas desde Zaragoza).

El turismo de nieve ha sido el motor principal por el que aquellos valles en los que se encuentran las estaciones de esquí, especialmente las de esquí alpino frente a las de fondo o nórdico, han sufrido una especialización en su economía. Estos valles eran propensos a sufrir el abandono por despoblación, como desgraciadamente ocurrió con muchos en las comarcas del Sobrarbe y la Ribagorza. Primero, el auge de los deportes de invierno facilitó la fijación de población durante una parte del año, posteriormente, gracias a la evolución y llegada de nuevos deportes y actividades, durante gran parte o todo el año. Deportes como el senderismo, alpinismo,

³ Consultar: El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades. <https://www.opcc-ctp.org/sites/default/files/documentacion/opcc-resumen-es-print.pdf>

escalada, espeleología, rafting o kayak son algunos ejemplos del potencial que presenta para multitud de empresas que viven de un recurso natural.

La llegada de turistas no solo es gracias a la nieve ni a los deportes ligados a la montaña, sino que también dispone de una gran riqueza cultural, histórica y gastronómica que se puede visitar a lo largo de todo el año.

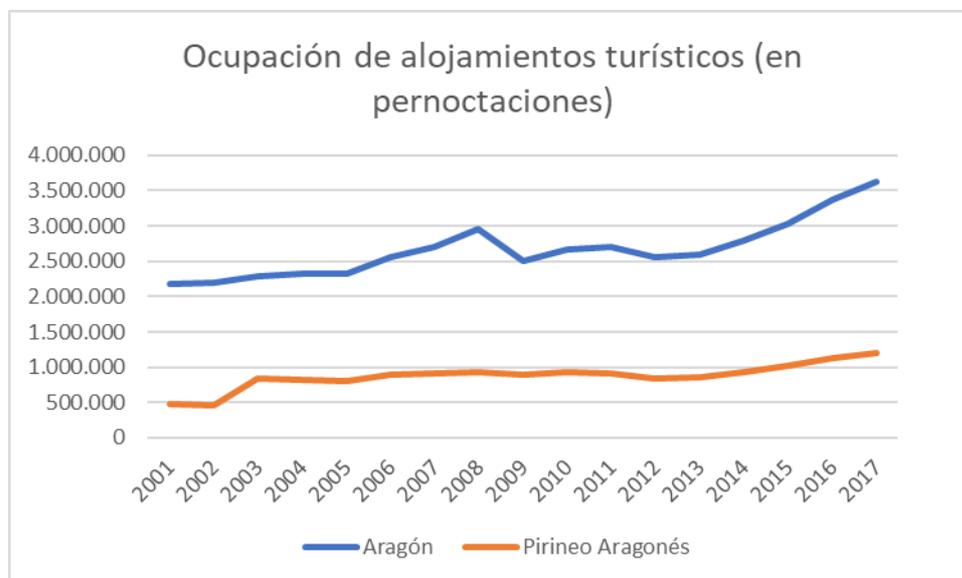


Figura 6 Evolución de la ocupación de todo tipo de alojamientos turísticos en Aragón y en el Pirineo.
Fuente: IAEST. Elaboración propia.

El Figura 6 muestra la evolución del número de pernoctaciones anuales en todo tipo de alojamientos (hoteles, camping, albergues...) en el Pirineo Aragonés y en el total de la Comunidad Autónoma. Se observa un salto importante entre el 2002 y el 2003, con un posterior estancamiento, rozando el millón de pernoctaciones anuales, hasta lograr superarlo en el año 2015. El año 2017 terminó con un balance superior a 1,2 millones de pernoctaciones en el Pirineo, lo que se traduce en que 1/3 de las pernoctaciones en todo Aragón se produjeron en un área reducida del territorio.

En cuanto a cifras se refiere, la aportación al PIB de Aragón por parte del sector de la nieve asciende al 8%, con unos 200 millones de euros⁴. Eso únicamente del periodo invernal, sin tener en cuenta todas las actividades mencionadas dos párrafos más arriba.

En el 2018, se desarrolló una plataforma online llamada Slow Driving Aragón⁵ desde el Gobierno, que plantea un turismo cultural por toda la Comunidad, con el fin de evitar la estacionalidad del turismo. Esta plataforma se integra dentro de lo que se conoce como Slow Tourism que, en grandes rasgos, defiende un turismo más sostenible, cultural y en beneficio de lo

⁴ Consultar: El impacto económico que genera la nieve en Aragón es de 200 millones de euros.
<http://aragonhoy.aragon.es/index.php/mod.noticias/mem.detalle/id.162054>

⁵ Consultar: Slow Driving Aragón. <http://www.slowdrivingaragon.com>

local, alejado de los grandes centros de turismo. Se proponen diferentes rutas, repartidas por toda la geografía de la Comunidad para diversificar el turismo por toda la región.

1.2. Aportaciones del trabajo y zona de estudio

Los efectos de la deposición de polvo sahariano sobre nieve en el Pirineo son el interés de estudio del Instituto Pirenaico de Ecología, entre otras muchas líneas de investigación. El 2018 fue el primer año que se llevó a cabo el proyecto para conocer la evolución del manto nival en relación a las partículas contaminantes, además del polvo sahariano también se trabajó con *black carbon* u hollín. Este último elemento tiene origen antrópico, causado por la actividad industrial humana y la quema de combustibles fósiles, mientras que el primero tiene origen natural, en su mayor medida, aunque se puede demostrar que en ciertas áreas del planeta, la deposición de partículas de polvo tiene un origen humano (Neff et al., 2008). La desertificación es causada por la destrucción de ecosistemas naturales resistentes a la escasez de precipitaciones para desarrollar una actividad agrícola y ganadera, en la que se roturan los suelos escasos de humedad que facilitan su evaporación. En consecuencia, las partículas arcillosas del suelo son fácilmente desplazables por los vientos a grandes distancias. Es un caso con diversos artículos dedicados en Estados Unidos, debido a los efectos que provocó la colonización del Oeste, con la ocupación y explotación de grandes extensiones de tierra.

Es conocido el caso del Dust Bowl, cuando en la Norteamérica de la Gran Depresión, grandes nubes de polvo cubrían toda la región a causa de una larga sequía y la antropización del medio, provocando millones de desplazados (Worster, 1979).



Figura 7 Imagen de una nube de polvo envolviendo una granja en EEUU en 1930.

Fuente: <https://www.livescience.com/4915-1930s-dust-bowl-bad.html>

1.2.1. Zona de estudio

El desarrollo del proyecto se ha llevado a cabo en la estación de la Cuenca Experimental de Izas, en el Pirineo aragonés, junto a la estación de esquí de Formigal. En la Figura 8 se muestra una imagen de la Cuenca en la que aparecen dos pluviómetros y el cobertizo donde se almacenan diferentes materiales empleados para la toma de datos.



Figura 8 Imagen de la Cuenca Experimental de Izas con algunos de los instrumentos. Elaboración propia

La cuenca de Izas se encuentra en las coordenadas $42^{\circ} 44' N$ $0^{\circ} 25' W$, a una altura entre los 2050 y 2280 metros sobre el nivel del mar. Es una zona de alta montaña mediterránea, inaccesible para vehículos que no sean helicópteros o motos de nieve. La zona suele estar cubierta por nieve unos 6 meses al año, y cuenta con unas precipitaciones en torno a los 1800 mm/año y una temperatura media anual de $5^{\circ} C$ (IPE). Pertenece al termino municipal de Sallent de Gállego.

En cuanto al equipamiento, en Izas se puede encontrar un anemómetro, dos pluviómetros (solo se utiliza uno), un piranómetro medidor del albedo y un sensor ultrasónico para medir la columna de nieve.

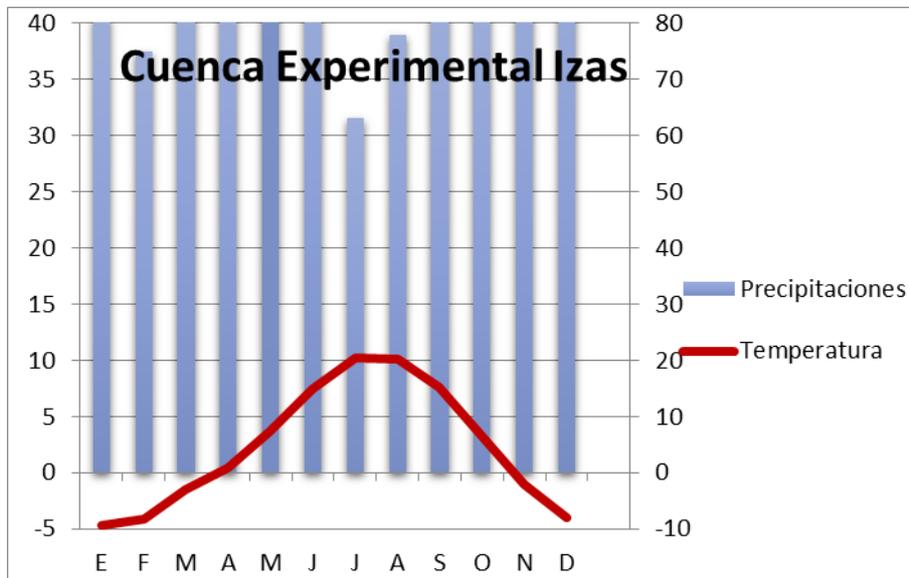


Figura 9 Climograma que representa las características la zona de estudio
Elaboración propia

En el Figura 9 se muestran las características climáticas de la Cuenca Experimental de Izas. Presenta un clima de alta montaña con abundantes precipitaciones (1600 mm) y una temperatura media de 2,5 °C. El mes más seco es julio y carece de estación seca. La mayoría de las precipitaciones son en forma de nieve durante el fin del otoño hasta bien entrada la primavera.

La Figura 10 muestra la posición de las parcelas en la Cuenca de Izas. Están situadas bajo una colina en un llano sin pendiente, lugar ideal para la localización de las parcelas. Se encuentran entre el Barranco de la Sierra y el Barranco Zarrambucho, que vierten al río Escarra. Se puede acceder a la zona desde la estación de esquí de Formigal al Norte, o desde una pista forestal a 1 hora a pie hacia el Este, en buenas condiciones meteorológicas.

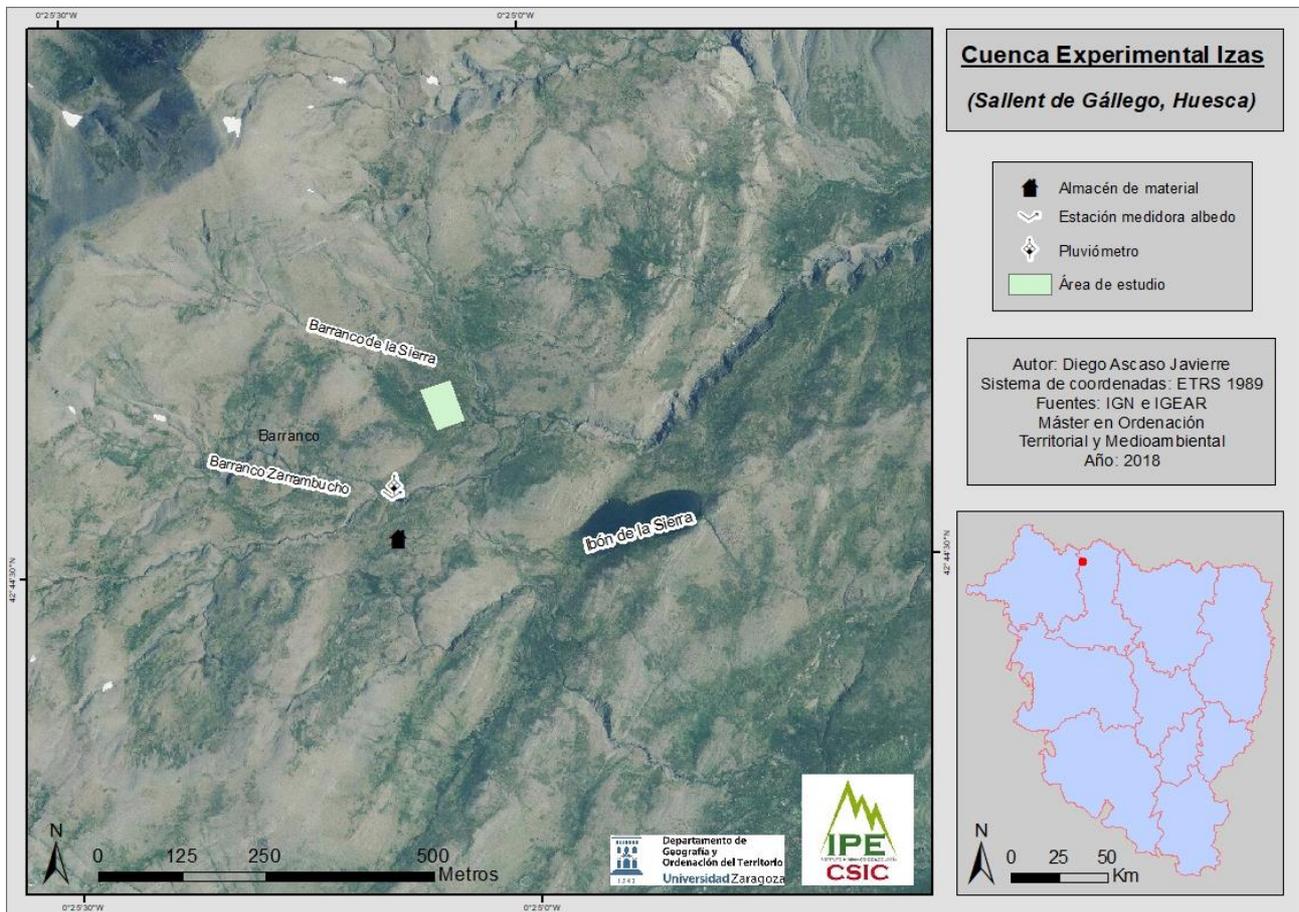


Figura 10 Mapa de localización del área de estudio. Elaboración propia

2. Datos y métodos

En este apartado se explican los objetivos planteados para el proyecto, así como la metodología y los procedimientos que se llevaron a cabo para la toma de datos y su posterior tratamiento.

2.1. Objetivos

En este trabajo no se pretende poner en relación si la llegada de polvo a las cumbres del Pirineo tiene causas antrópicas o no, sino que el interés es analizar qué efectos tiene sobre la nieve y su evolución. Además del polvo sahariano, también se pretendía analizar los efectos del Black Carbon (BC), pero dos precipitaciones naturales de polvo sahariano, una de ellas excepcional, y las condiciones meteorológicas excepcionales de la campaña invierno-primavera de 2018, modificaron y reorientaron la manera en la que se pretendía llevar a cabo el trabajo. Los objetivos planteados fueron los siguientes:

1. Controlar la deposición de polvo y otras impurezas
2. Verificar la reducción de albedo con la aparición de impurezas
3. Confirmar la relación entre la aparición de impurezas y la aceleración de la fusión
4. Analizar la relación entre la temperatura y la fusión
5. Comprobar la relación entre densidad e impurezas en la nieve

2.2. Metodología

En este apartado se explica la metodología que se ha llevado a cabo para conseguir alcanzar los objetivos planteados en el punto 2.1. del presente trabajo. Como muestra la Figura 11, se comenzó con una salida de campo el día 13 de marzo de 2018 (todos los días de campaña se realizaron en este año), aunque el equipo del IPE encargado del proyecto ya había estado con anterioridad en dos ocasiones.

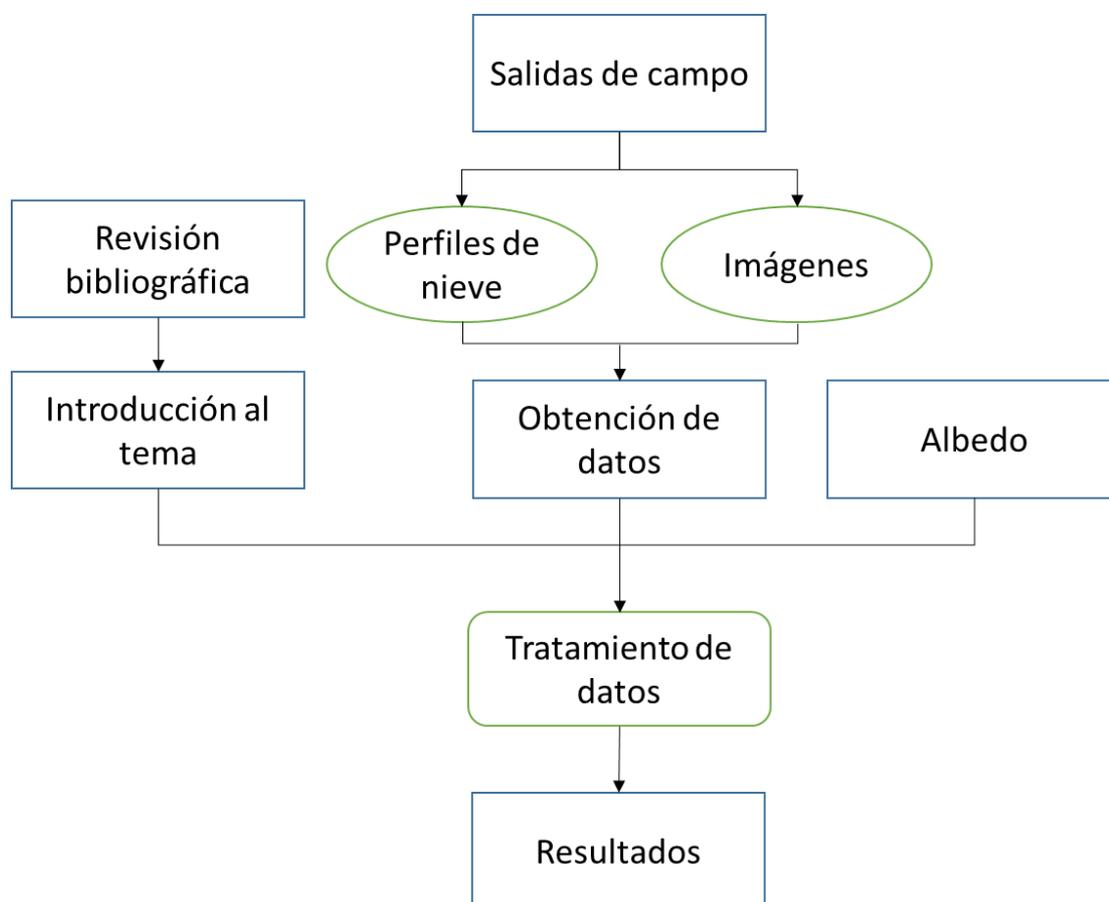


Figura 11: Esquema de las acciones llevadas a cabo para desarrollar el proyecto. Elaboración propia

En las dos primeras salidas (la primera el 18 de enero), el equipo se encargó de transportar el material necesario para delimitar las parcelas. Una vez delimitadas y geolocalizadas, se procedió a la deposición manual y uniforme de las partículas contaminantes en las 6 parcelas.

En la Tabla 1 se muestra la relación de cada parcela con su contenido correspondiente. La denominación “Dust” proviene del inglés y hace referencia al polvo desértico que se añadió. El factor multiplicador hace referencia a la cantidad de concentración que se decidió añadir en cada parcela o “Plot”, para analizar sus efectos.

Tabla 1: Relación de las parcelas y el contenido de cada una.
Fuente: IPE. Elaboración propia

Parcela	Contenido
Plot 1	BC x3
Plot 2	Control
Plot 3	Dust x3
Plot 4	BC x10
Plot 5	Dust x10
Plot 6	Control

En las siguientes Figuras 12 y 13, se muestran las labores de esparcimiento de las partículas y una imagen general del conjunto de las parcelas.



Figura 12: Esparcimiento de las impurezas sobre la nieve.
Fuente: IPE



Figura 13: Vista general de la zona de estudio.
Fuente: IPE

En la segunda salida, el día 31 de enero, se realizaron los primeros perfiles de nieve. Para ello se excavan trincheras en un lateral de cada parcela de la que se desea extraer información (temperatura, densidad y granulometría). Cada una de estos datos se extrae del perfil de la columna de nieve, a diferentes alturas y siempre empezando desde la parte superior de ella:

- Temperatura: se mide con un termómetro. Se toma la temperatura del aire, la de la superficie, a 2,5 cm, a 5 cm y, desde aquí cada 5 cm hasta intentar llegar al suelo (Figura 14).

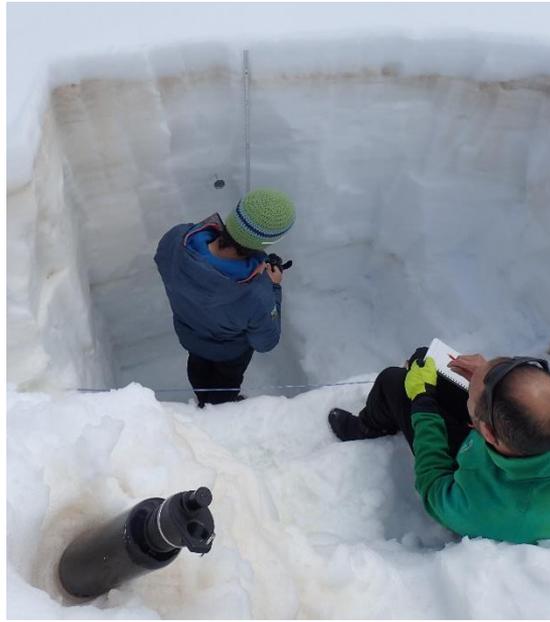


Figura 14: Medición de la temperatura del perfil de nieve.
Fuente: IPE

- **Densidad:** se mide con una cuña de metal que posee un peso específico y un volumen de 1 litro. Se extrae una muestra cada 10 cm (Figura 15), tomando una réplica para asegurarse que la medida es correcta. Se pesan en una báscula electrónica (Figura 16) las muestras y se obtiene el peso en gramos. Al tratarse de 1 litro de volumen, el resultado será la densidad en gr/litro o, aplicando la conversión, de kg/m^3 .



Figura 15: Extracción de nieve con la cuña.
Fuente: IPE



Figura 16: Pesaje de la cuña con nieve para obtener la densidad.
Fuente: IPE

- **Granulometría:** se mide a través de la observación directa y el tacto (Figura 17).. Sirve para diferenciar los diferentes tipos de grano en la columna de nieve y el estado de metamorfismo. Se puede decir, que se diferencian diferentes horizontes en la columna

gracias al grosor del grano, la existencia o no de hielo y la observación de partículas contaminantes. Cuanto mayor sea el grano de nieve, mayor será su estado metamórfico.



Figura 17: Medición del tamaño del grano de nieve.
Fuente: IPE

- Imágenes de la Cuenca Experimental de Izas: dicha estación cuenta con diversos instrumentos que se utilizan para la recopilación de datos durante todo el año. Cuenta con una cámara de fotos fija, la cual no se encuentra en la estación en sí, si no que su posición permite una vista de la estación. Toma 3 imágenes diarias: a las 10:00, 11:00 y 12:00. En la Figura 18 se muestra una serie de imágenes de los últimos días con cobertura de nieve en la zona de estudio.



Figura 18: Secuencia de imágenes de la Cuenca Experimental de Izas. Las imágenes muestran la evolución de los últimos días del manto de nieve en la zona de estudio. Fuente: IPE

2.3. Seguimiento de las parcelas

Para la recopilación de datos de las columnas de nieve, el trabajo de campo es imprescindible. Para ello se llevaron a cabo 8 jornadas de campaña, repartidas entre enero (2 salidas); febrero y marzo (1 salida por mes); y mayo (4 salidas). Destacar que la salida del 13 de marzo fue inútil y no se pudo recopilar ningún dato, debido a la gran cantidad de nieve polvo que había precipitado desde el 23 de febrero que fue la anterior salida. El espesor era tal, que había sepultado por completo las balizas de las parcelas. Junto a ello, el esfuerzo para llegar hasta la zona de estudio no fue pequeño, debido a las adversas condiciones meteorológicas del día, que convirtió la aproximación de poco más de 1h 30m en 3h 30m.

- Día 31 de enero de 2018

Se trabaja en los Plot 1, 2, 3, 4 y 5, midiendo temperaturas y densidades para cada perfil. En la Figura 19 se representa la trinchera con el perfil de nieve del Plot 4 y la granulometría que posee. Entre esta salida de campo y la primera, hay 11 días de diferencia y ya aparece el grano de fusión en

la capa de polvo sahariano, pero como aún es enero, ni la radiación ni las temperaturas son elevadas, por lo que al anochecer se vuelve a congelar el agua fundida, de ahí la costra de rehielo.

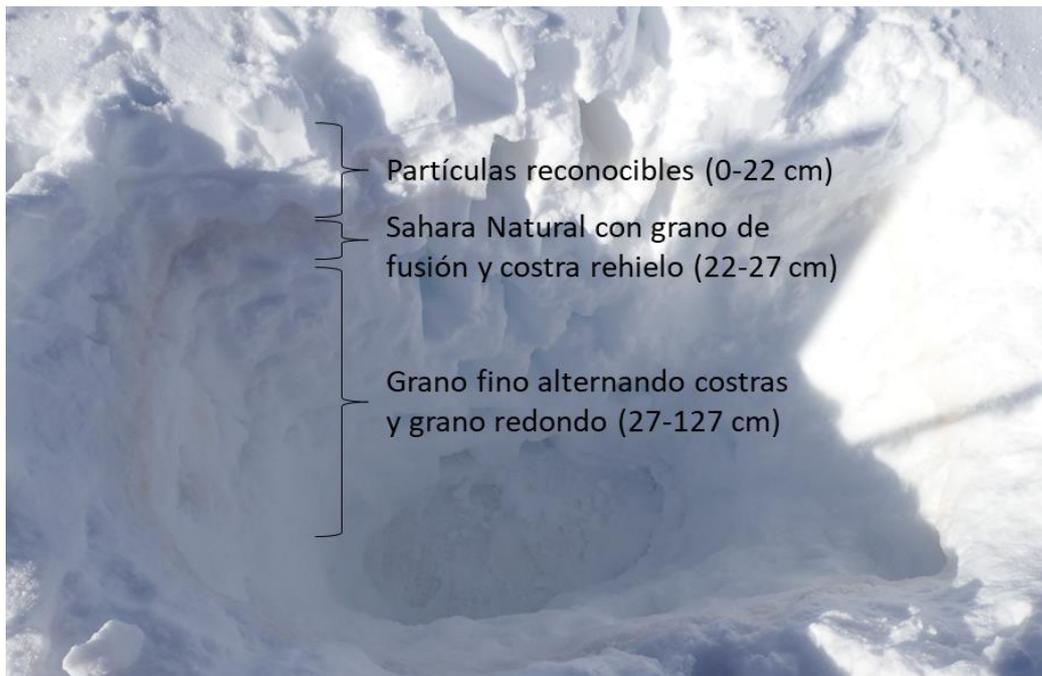


Figura 19: Imagen del Plot 4 el día 31/01/2018
Fuente: IPE

- Día 23 de febrero de 2018

Se trabaja en los Plot 1, 2 y 3, midiendo temperaturas y densidades para cada perfil. Las imágenes tomadas ese día no son representativas.

- Día 13 de marzo de 2018

Debido a las malas condiciones que hacen imposible la recopilación de datos, se decide excavar nuevas trincheras para evitar este esfuerzo en próximas salidas. El esfuerzo será en vano ya que hasta mayo no se vuelve a la zona.

- Día 4 de mayo de 2018

Se trabaja en los Plot 4 y 6, midiendo temperaturas y densidades para cada perfil. Jornada de trabajo intenso, especialmente por la gran cantidad de nieve que había que retirar para llegar hasta el suelo. Se alcanzó una profundidad de 185 cm sin conseguir llegar a la superficie donde se asienta la columna de nieve. En el corte de nieve de la Figura 20 aparece la capa de polvo sahariano precipitado en el evento del 6 de abril y sepultado por una capa de nieve polvo.

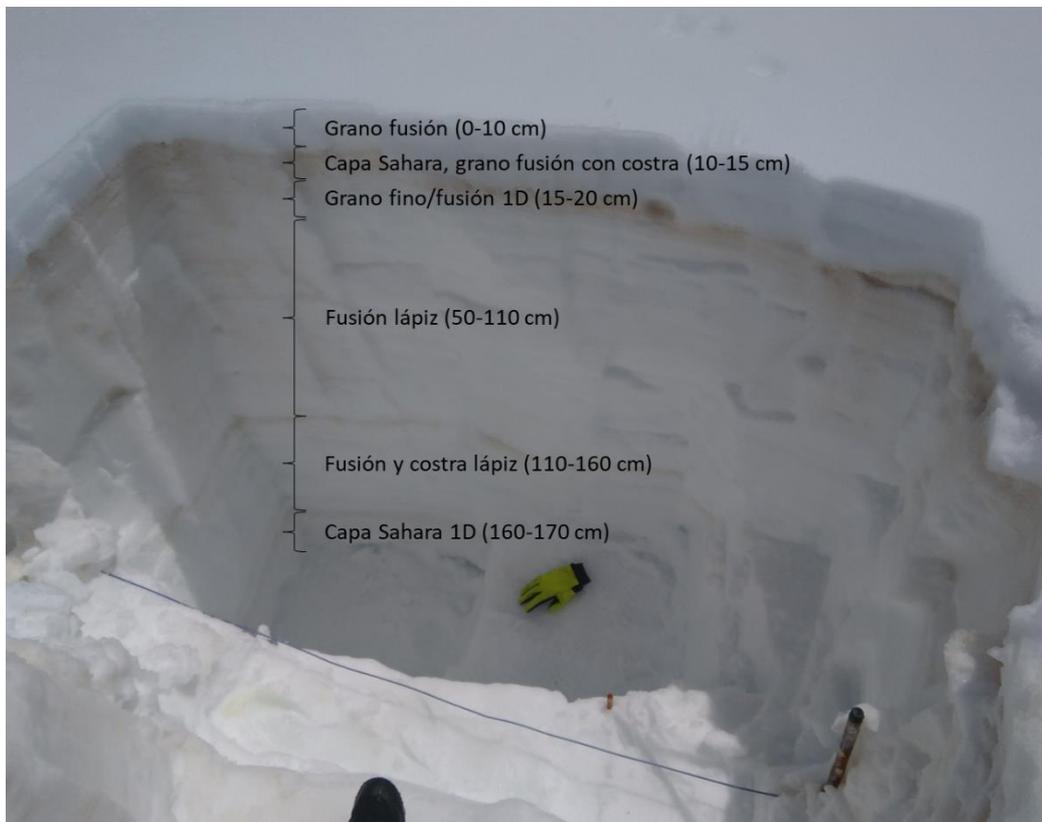


Figura 20: Imagen del Plot 6 el día 4/05/2018
Fuente: IPE

Es a partir de esta fecha cuando se aprecia el funcionamiento de la fusión de la nieve debido al incremento de las temperaturas y al aumento de las horas de radiación solar, como muestra el tipo de grano del perfil del Plot 6.

- Día 14 de mayo de 2018

Se trabaja en los Plot 1 y 2, midiendo temperaturas y densidades para cada perfil. En esta ocasión sí que se consigue excavar hasta llegar al suelo. En la Figura 21 se muestra el perfil del Plot 1, donde la granulometría muestra las capas superiores e inferiores en proceso de fusión con grano fino. Se alternan las capas de Sahara natural y BC.

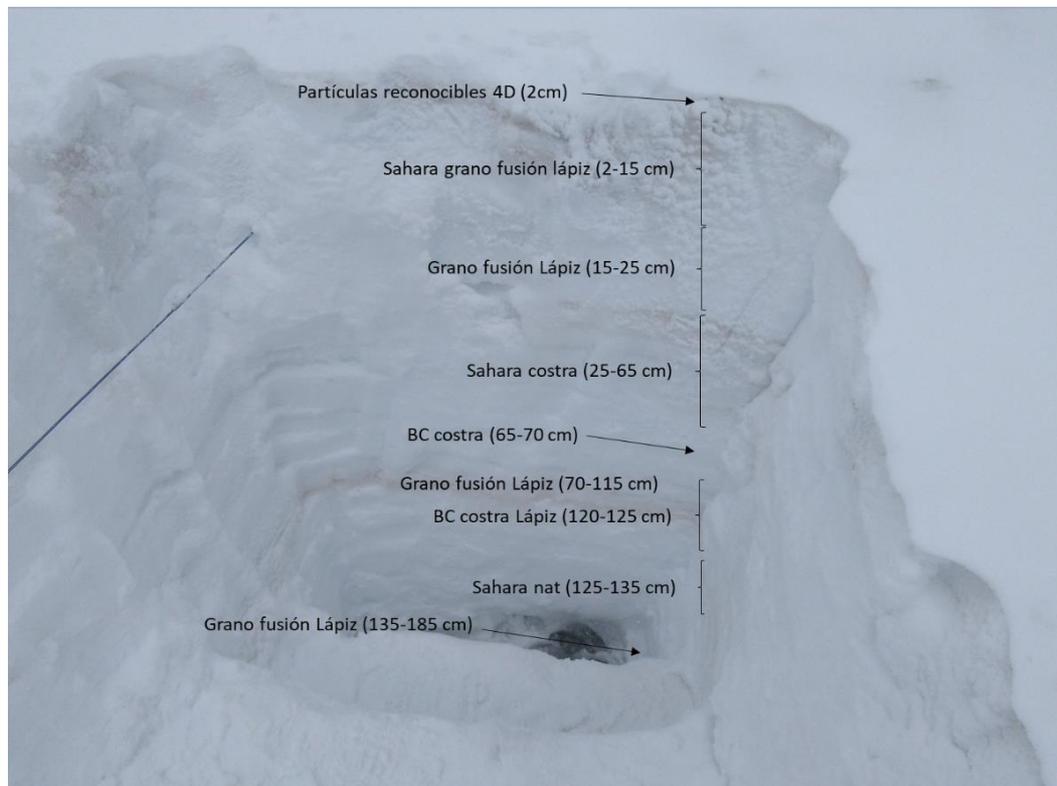


Figura 21: Imagen del Plot 1 el día 14/05/2018
Fuente: IPE

- Día 21 de mayo de 2018

Las condiciones meteorológicas impiden trabajar con comodidad, por lo que solamente se recogen muestras para su análisis en laboratorio.

- Día 29 de mayo de 2018

Último día de salidas de campo. Se trabaja en los Plot 1 y 2, midiendo temperaturas y densidades para cada perfil. Como muestra la Figura 22, el estado de la nieve y de las parcelas es muy evolucionado, con 75 cm de espesor. En este día, realizar la medición de granulometría era innecesaria, ya que el estado de fusión de las parcelas era avanzado.



Figura 22: Imagen del Plot 1 el día 29/05/2018
Fuente: IPE

2.4. Medición de albedo in situ

Uno de los puntos interesantes de este trabajo era, como el título del punto indica, la obtención de datos de albedo los días que se realizaban las tareas descritas anteriormente. La recopilación de estos datos tenía por objetivo conocer con exactitud la energía absorbida y reflejada por el manto nevado, de tal forma que se podría estimar la afección de las impurezas en la nieve.

Las mediciones se llevaron a cabo, pero los datos resultaban confusos y extraños. La causa de tal problemática se debe a las condiciones meteorológicas adversas y la gran cantidad de días nublados que ha habido en esta campaña de invierno-primavera. En los días con nubosidad, la medición del albedo es complicada debido a la inestabilidad de la señal de radiación que varía constantemente, además de que la radiación es difusa y la reflejada puede superar a la incidente. En la Figura 23 se representa la medición del albedo en un día con mucha nubosidad.



Figura 23: Medición del albedo in situ el día 14/05/2018
Fuente: IPE

2.5. Empleo de datos continuos de temperatura, albedo y espesor de nieve

En cuanto a los datos continuos, se dispone de la Cuenca Experimental de Izas, que cuenta con un piranómetro, instrumento que mide la radiación en onda corta incidente y reflejada, termómetro para la temperatura del aire y sensor de altura del manto de nieve. Datos continuos de este último factor solo se disponen desde el día 2 de mayo, suficientes para observar todo el proceso de fusión y poder cruzar los datos con el albedo y la temperatura, además de las impurezas sobre las que gira el trabajo.

Como se explica en el anterior punto, la recopilación manual de datos de albedo ha sido prácticamente inútil por la nubosidad registrada en todas las campañas de primavera, por lo que se utilizarán los datos facilitados por el medidor instalado en la estación Experimental de Izas. El sensor recoge datos de la radiación de onda corta incidente (R_{in}) y la reflejada (R_{out}) cada 10 minutos, 24 horas al día. Se decide escoger aquellos que se encuentran entre el rango horario de las 11:00 y las 15:00, las horas de Sol más propicias y en las que incide con un ángulo más perpendicular, por lo que se obtienen 25 datos con la energía incidente y otros 25 con la energía reflejada. Para calcular el albedo, primero se realiza un promedio diario con los datos de R_{in} y R_{out} y, posteriormente se divide R_{out}/R_{in} . El resultado da un valor entre 0 y 1, por lo que cuanto más se acerque a 1, el albedo será mayor.

En cuanto a las temperaturas, se recopilaron los datos recogidos por la misma estación, con un total de 144 registros cada 24 horas, por lo que se decidió realizar el promedio para cada día. Con estos datos, y cruzándolos con los anteriores, facilita la observación de la fusión y permite analizar el efecto de las temperaturas en la reducción del espesor de nieve.

2.6. Condiciones nivo-meteorológicas invierno-primavera 2018 e impacto en el plan de trabajo

La campaña invierno-primavera del año 2018, se caracteriza por haber sido una temporada con nevadas excepcionales, ya que ha habido zonas con acumulaciones de más de 3 metros de nieve, gran cantidad de días cubiertos por las nubes y, el que más ha influido en este estudio, dos eventos de precipitación de polvo sahariano, uno a finales de enero y otro a comienzos de abril.

El más importante de ellos y, por tanto, más determinó este proyecto, fue el ocurrido el 6 de abril de 2018. Según Jorge Pey (2018), este evento fue mucho más intenso que otro ocurrido en 2016, también catalogado como fuerte. En esta ocasión, se registran hasta 12 gramos de polvo por metro cuadrado, mientras que en el del 2016 fueron 6 gramos por metro cuadrado⁶.

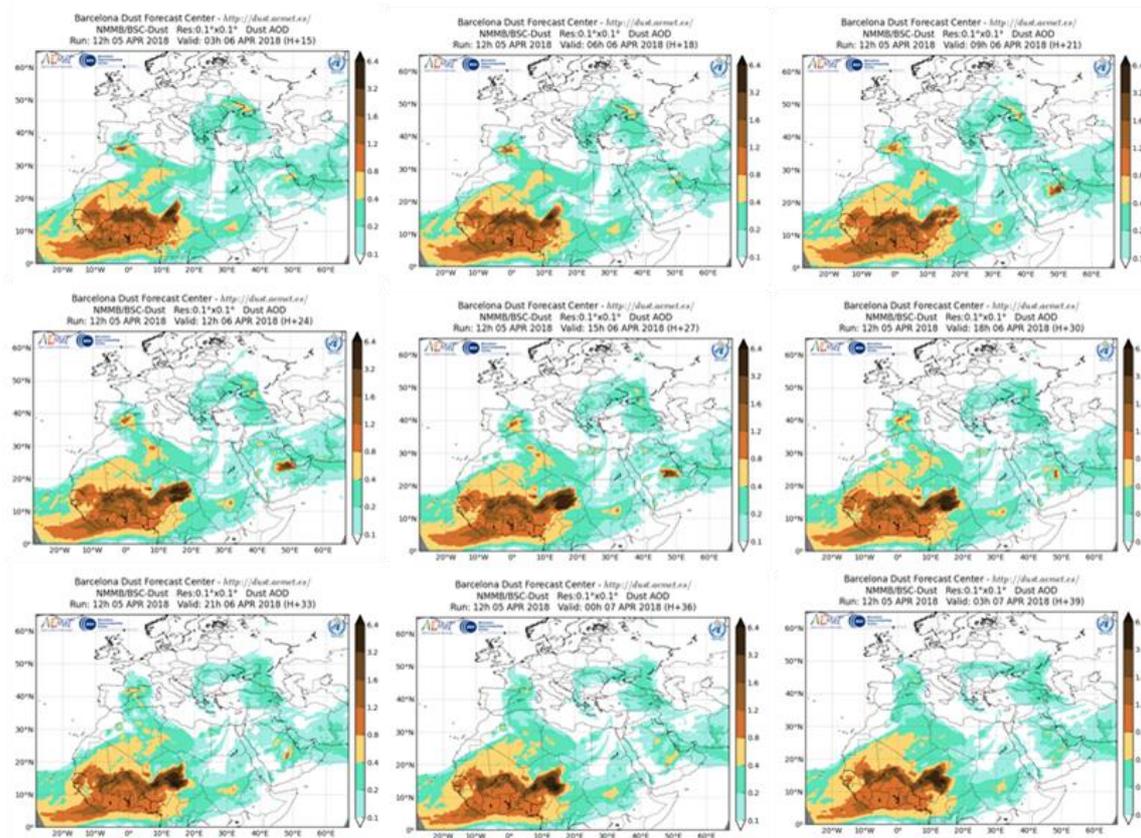


Figura 24: Secuencia de imágenes que muestran la evolución de la nube de polvo sahariano del evento del 6 de abril de 2018. Fuente: Barcelona Dust Forecast Center

⁶ Consultar: Científicos plantean que el polvo sahariano en el Pirineo favorece las crecidas del Ebro https://www.eldiario.es/aragon/sociedad/Cientificos-confirman-sahariano-Pirineo-Ebro_0_782172319.html

En esta secuencia de imágenes, Figura 24, se muestra la evolución de la nube de polvo procedente del norte de África. Atraviesa el litoral mediterráneo español hasta llegar al Pirineo, donde se mezcla con la borrasca que se encontraba en la zona. Las partículas de polvo se asocian con las de agua y con los cristales de hielo, que posteriormente se convierten en nieve. En las zonas donde no se dan las condiciones para que precipite nieve, la lluvia con barro se deja notar en los coches y vegetación. La llegada de este evento hizo modificar y reorientar el proyecto, ya que analizar los efectos del BC en el manto de nieve pasa a un segundo plano, pues es prácticamente imposible sacar resultados óptimos para esta impureza por culpa de la gran cantidad de polvo sahariano.

La temporada estuvo marcada por las continuas nevadas, que dificultaron enormemente la medición de albedo, importantísimo para el interés del estudio. Aun así, se disponen de datos continuos de albedo gracias a los instrumentos de la Estación Experimental de Izas, además del mes de mayo, el más importante a efectos de fusión nival en el Pirineo.

3. Resultados

En este punto se muestran los resultados que se han obtenido a través del tratamiento de datos en Excel:

- Temperatura de los perfiles

En primer lugar, hay que destacar que no existen diferencias en el régimen térmico de las distintas parcelas. La temperatura en la columna de nieve es variable en los primeros niveles, generalmente hasta los 10 centímetros de profundidad. A partir de aquí se estabiliza en torno a los 0°C. La inestabilidad producida en las capas más superficiales está ligada al contacto con la atmósfera, y el intercambio de calor con ella, y la recepción de energía radiante, la cual penetra unos centímetros. Estas capas almacenan la energía en forma de calor latente y provocan las diferencias de temperaturas.

La temperatura en las capas que se están haciendo mención, también está influida por las condiciones meteorológicas del entorno, ya que en días fríos la temperatura será menor que en días calurosos. Por lo tanto, los primeros centímetros de nieve funcionan como aislante de las capas más profundas, que permiten la estabilidad en su temperatura.

En los perfiles que se consiguió llegar al suelo (Figuras 25 y 26), se aprecia un aumento en la temperatura, debido a la capacidad del mismo para retener el calor absorbido durante los meses que se encuentra sin cubierta de nieve. El suelo se encuentra por encima de los 0° C e intercambia el calor con la capa de nieve en contacto con él.

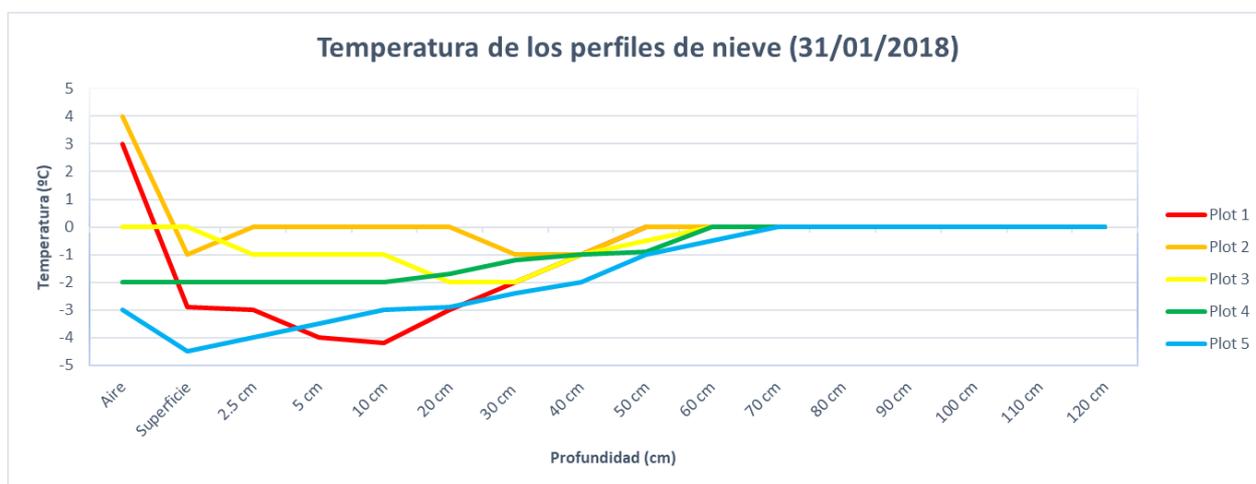


Figura 25 Temperatura de los perfiles de nieve realizados el día 31 de enero



Figura 26 Temperatura de los perfiles de nieve realizados 23 de febrero

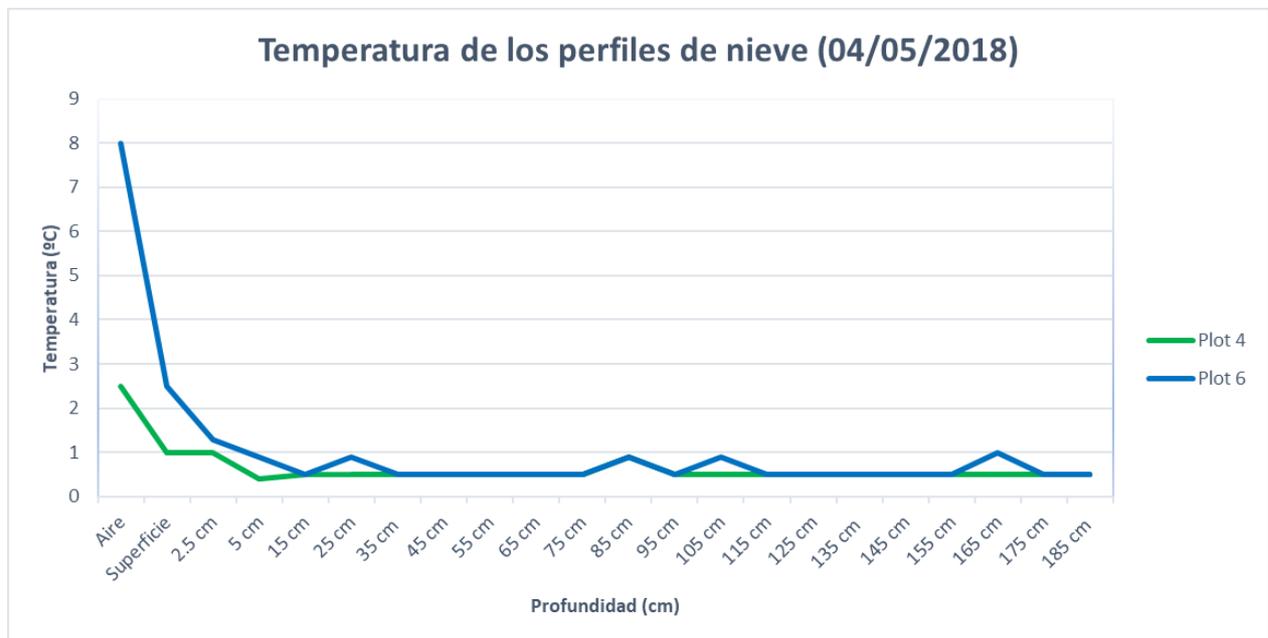


Figura 27 Temperatura de los perfiles de nieve realizados 4 de mayo

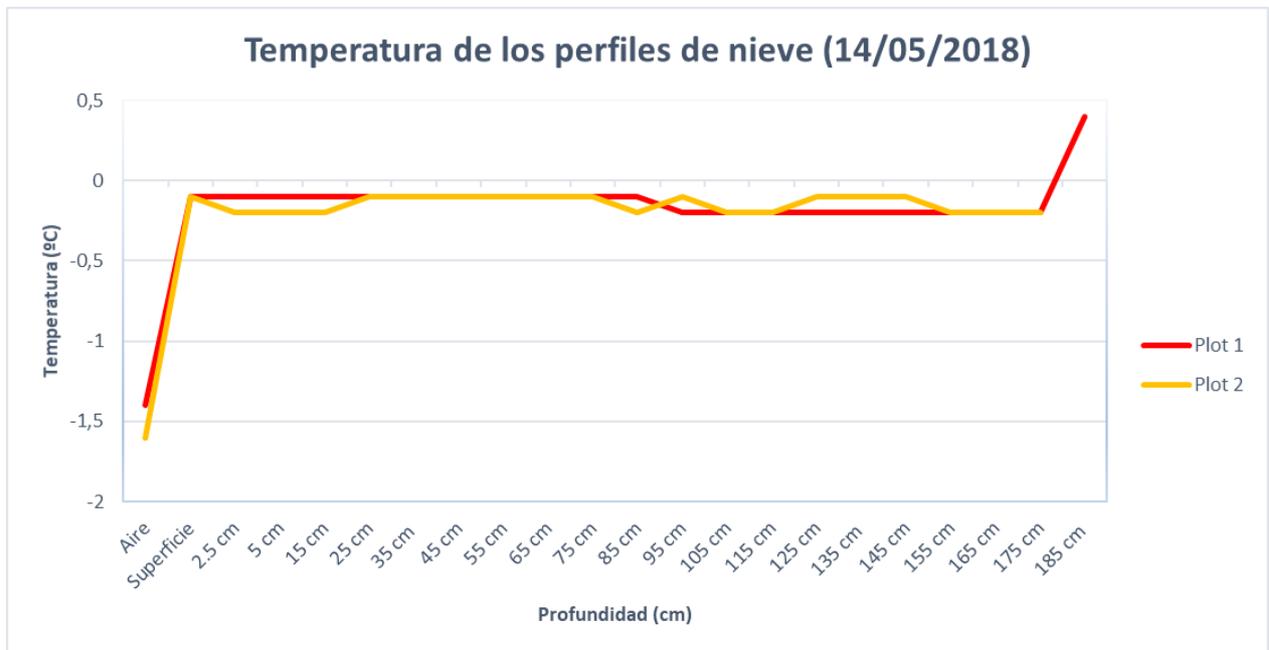


Figura 28 Temperatura de los perfiles de nieve realizados 14 de mayo

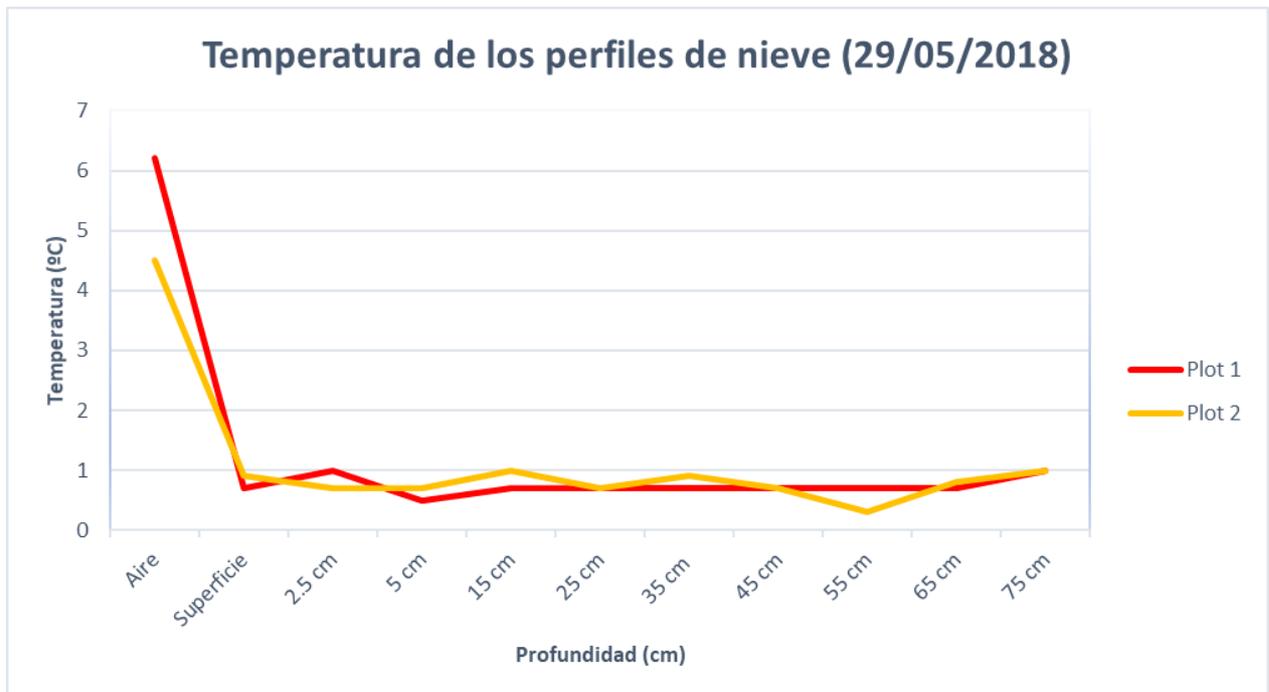


Figura 29 Temperatura de los perfiles de nieve realizados 29 de mayo

- Densidad de la nieve

La densidad, de forma general, aumenta conforme se profundiza en la columna de nieve y esto se debe a varios factores:

- La nieve polvo o recién caída tiene una densidad aproximada de 100 kg/m^3
- La presión que ejercen las capas superiores

- El estado de fusión de la nieve

Los picos de aumento de la densidad que se recogen en las Figuras 30, 31, 32, 33 y 34, se corresponden con un tipo de grano de nieve concreto: el grano de fusión. Este tipo de grano es el que se produce cuando la nieve supera el punto de madurez, que es el límite de agua líquida capaz de retener la nieve, y a partir de aquí comienza a fundir, como recoge Herrero (2007).

A priori, se puede pensar que la existencia de impurezas en la nieve provocaría, a partir de su posición, un aumento en la densidad de la nieve, pero los resultados que se recogen en las gráficas no muestran que exista una correlación de ello, como se ve en las Figuras 32 y 33, por lo que la variación en la densidad no se ve influida por las impurezas.

El tipo de grano es posible determinarlo a través del análisis del perfil de nieve a simple vista y comprobando la resistencia que ejerce frente a un lápiz, los dedos o el puño. A mayor resistencia, mayor estado de resistencia a la fusión.

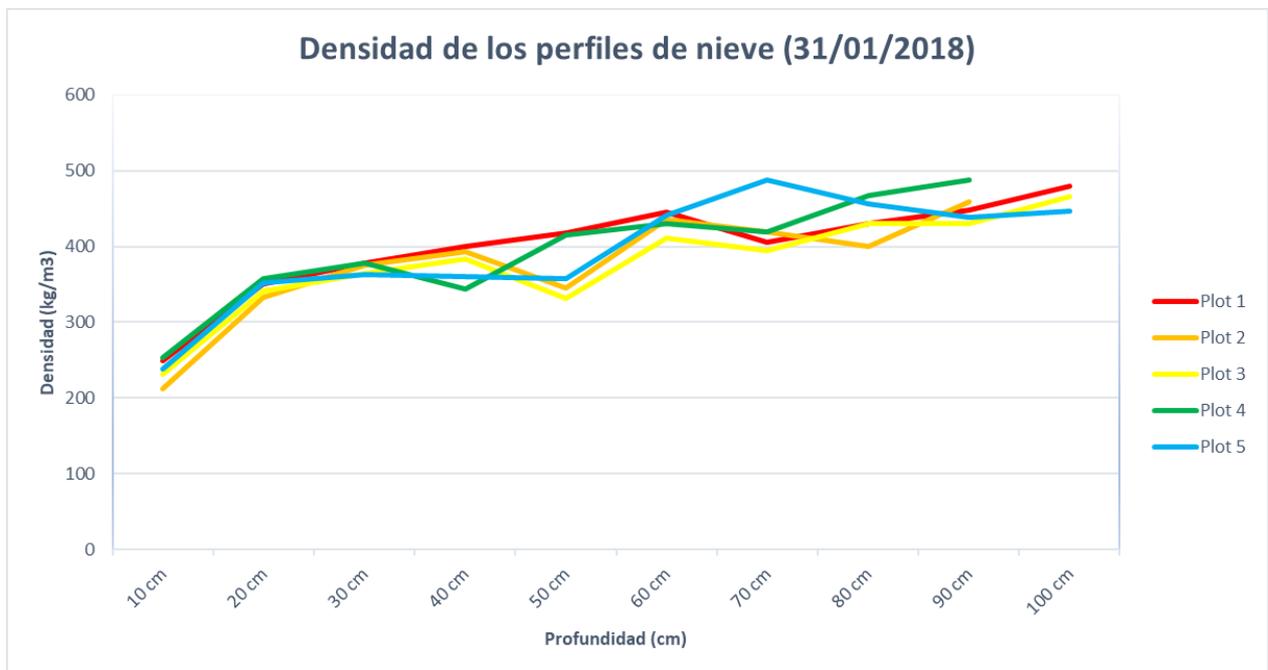


Figura 30 Densidad de los perfiles de nieve realizados el 31 de enero

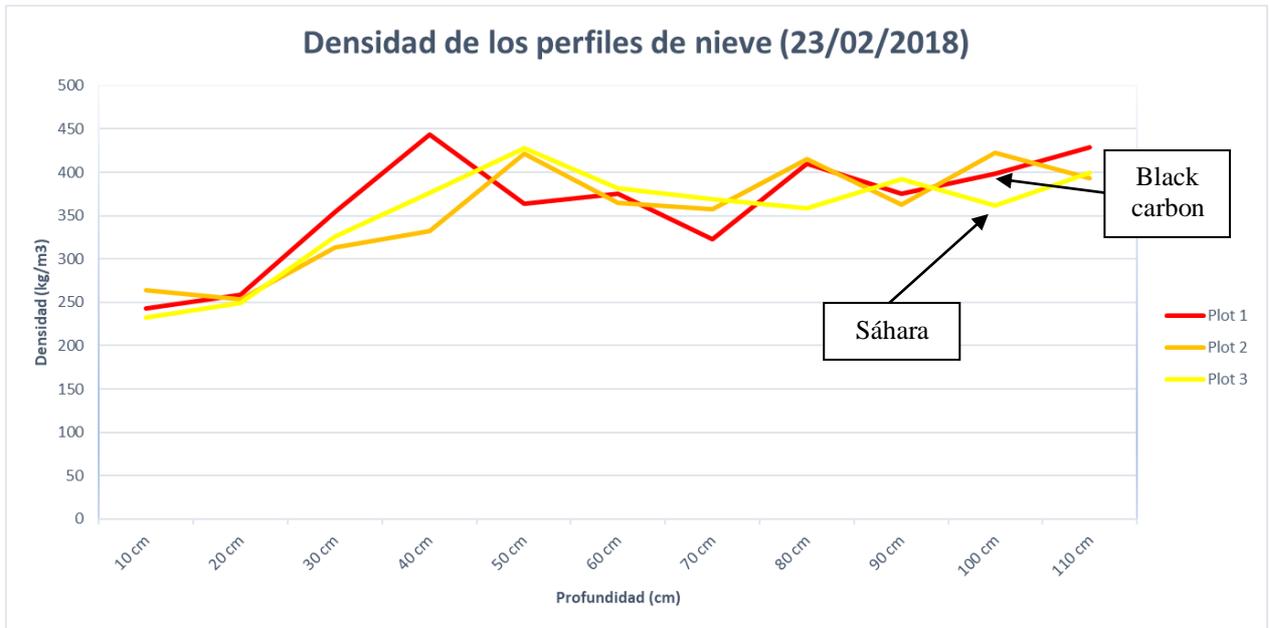


Figura 31 Densidad de los perfiles de nieve realizados el 23 de febrero

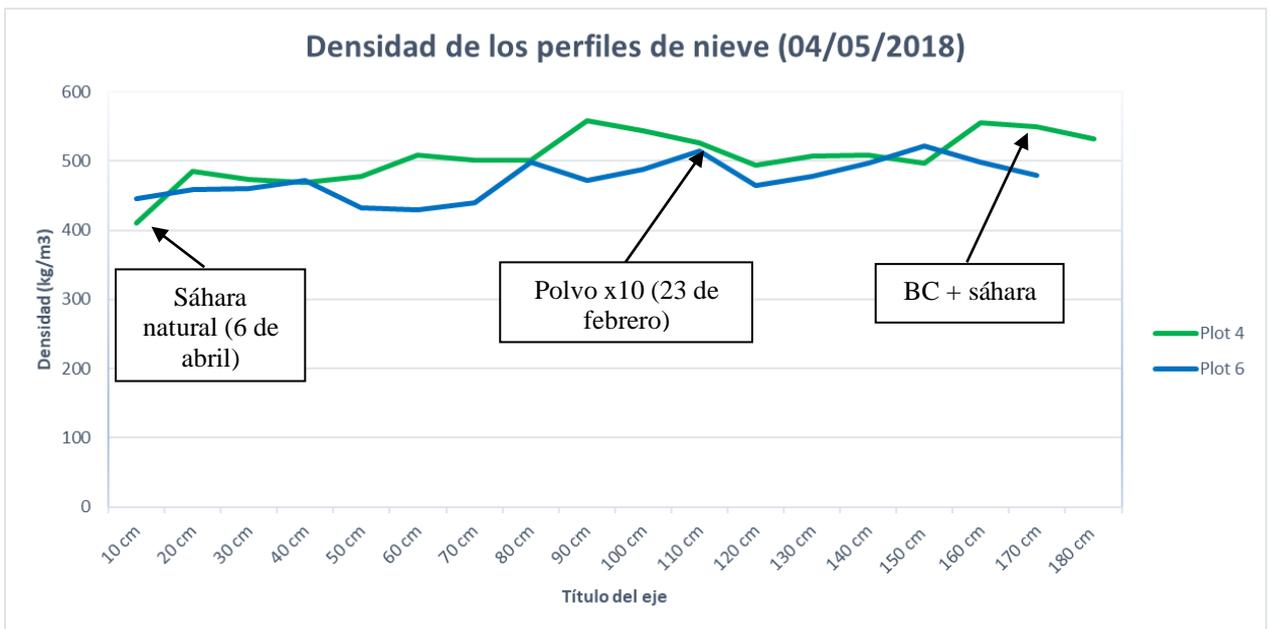


Figura 32 Densidad de los perfiles de nieve realizados el 4 de mayo

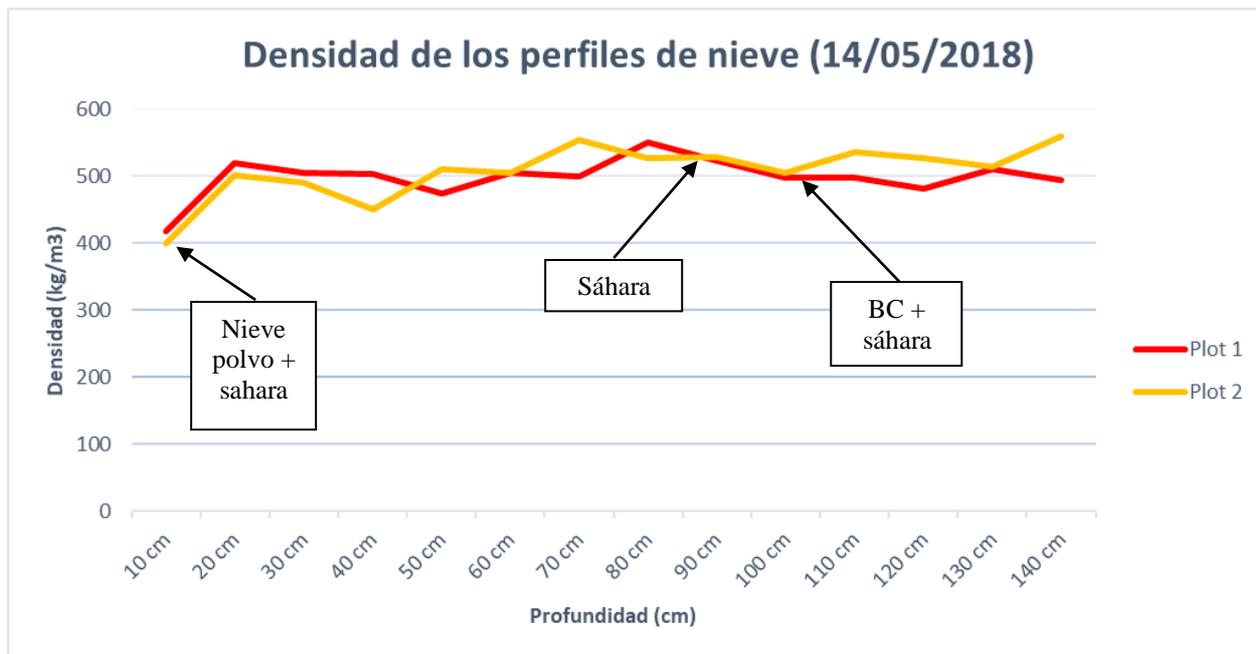


Figura 33 Densidad de los perfiles de nieve realizados el 14 de mayo

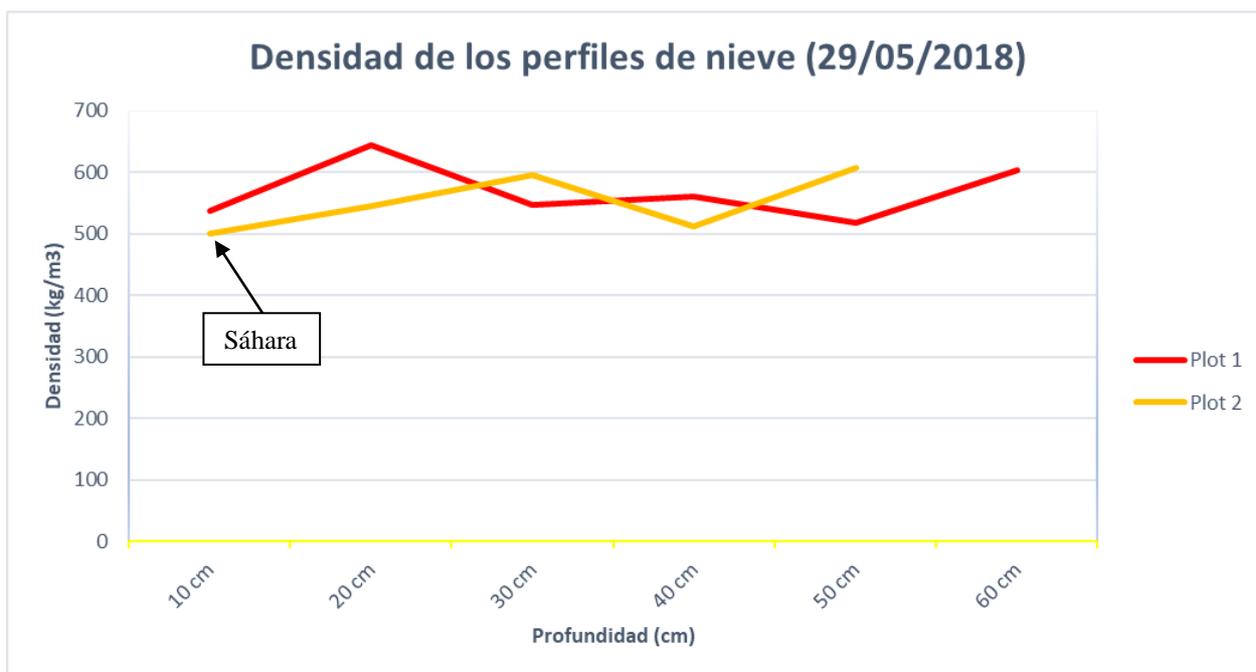


Figura 34 Densidad de los perfiles de nieve realizados el 29 de mayo

- Albedo

En la Figura 33 se observa cómo se comporta la columna de nieve en relación a su albedo en el mes de mayo. Este mes tiene mayores horas de Sol que los anteriores y las temperaturas comienzan a aumentar. A comienzos del mes, los valores de albedo son medianamente altos (entre 0,6 y 0,7) y típicos de una superficie nevada, pero en estado de metamorfismo avanzado, hasta los días 4 y 5 de mayo, donde se desploma por la fusión de la capa superior de nieve limpia (Figura 35)

y sacando a la luz la capa de polvo sahariano del evento del 6 de abril. Aparece una superficie de color marrón-rojizo que mezcla el polvo y la nieve, con bajos valores de albedo (entre 0,51 y 0,38) y, en consecuencia, mayores de absorción, por lo que la fusión es mayor. Esta capa facilita y acelera los valores de fusión de tal modo que en escasos 10 días se derriten más de 40 cm de nieve.

La fusión se reduce drásticamente por dos motivos: la caída de las temperaturas medias, pasando de 4,5 °C el 11 de mayo a -4 °C el 13 de mayo (Figura 34); y, a la caída de una nueva capa de nieve en torno al 10-11 de mayo, que cubre la mezcla de polvo y nieve y, a su vez, provoca un importante aumento de los valores de albedo (de 0,38 a 0,75), al tener una capa de nieve polvo en la parte superior de la columna.



Figura 35 Secuencia de imágenes de la Cuenca Experimental de Izas que muestra la aparición del polvo sahariano. Fuente: IPE

Pasados unos días, esta última capa se derrite y deja paso de nuevo a la mezcla de nieve y polvo sahariano, que no tarda en desplomar los valores de albedo (entre 0,45 y 0,3), y aumentar la tasa de fusión. Desde la reaparición de esta capa hasta la fusión total de lo que queda de nieve (71 cm), apenas transcurren 10 días.

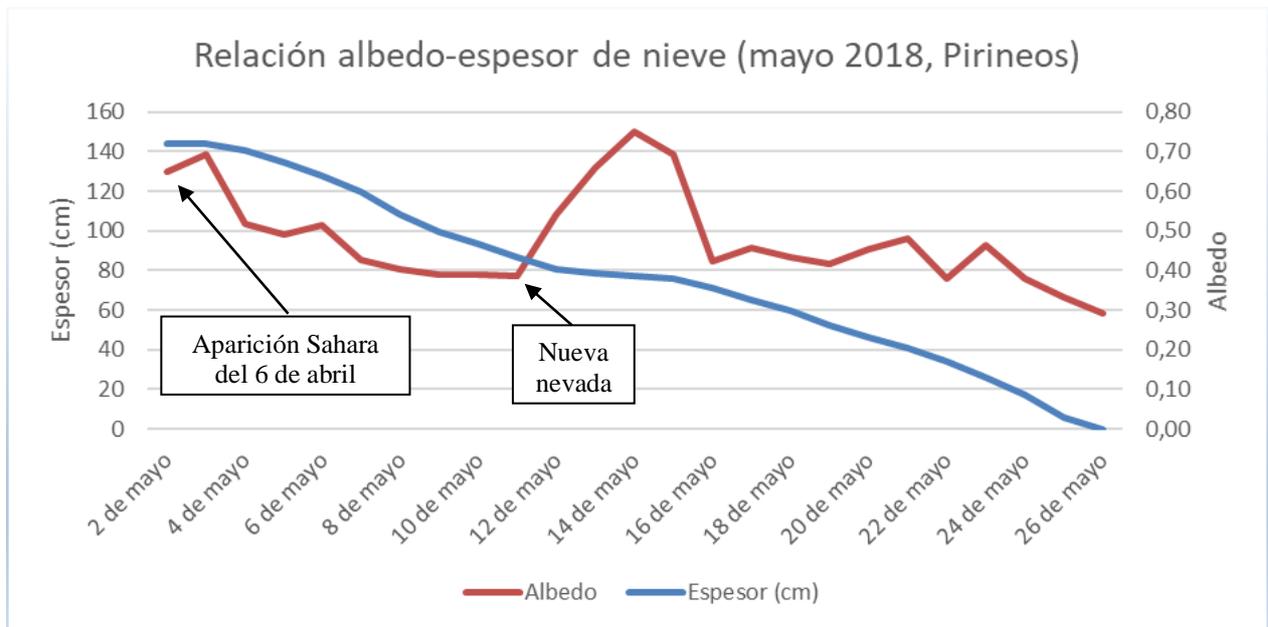


Figura 36 Evolución del espesor de la columna de nieve en relación al albedo

- Temperaturas de mayo y fusión

En la Figura 37 se representa, al igual que en la anterior, el espesor de nieve en el mes de mayo, pero comparado con las temperaturas medias de cada día, con el fin de determinar el grado de influencia de estas sobre el espesor.

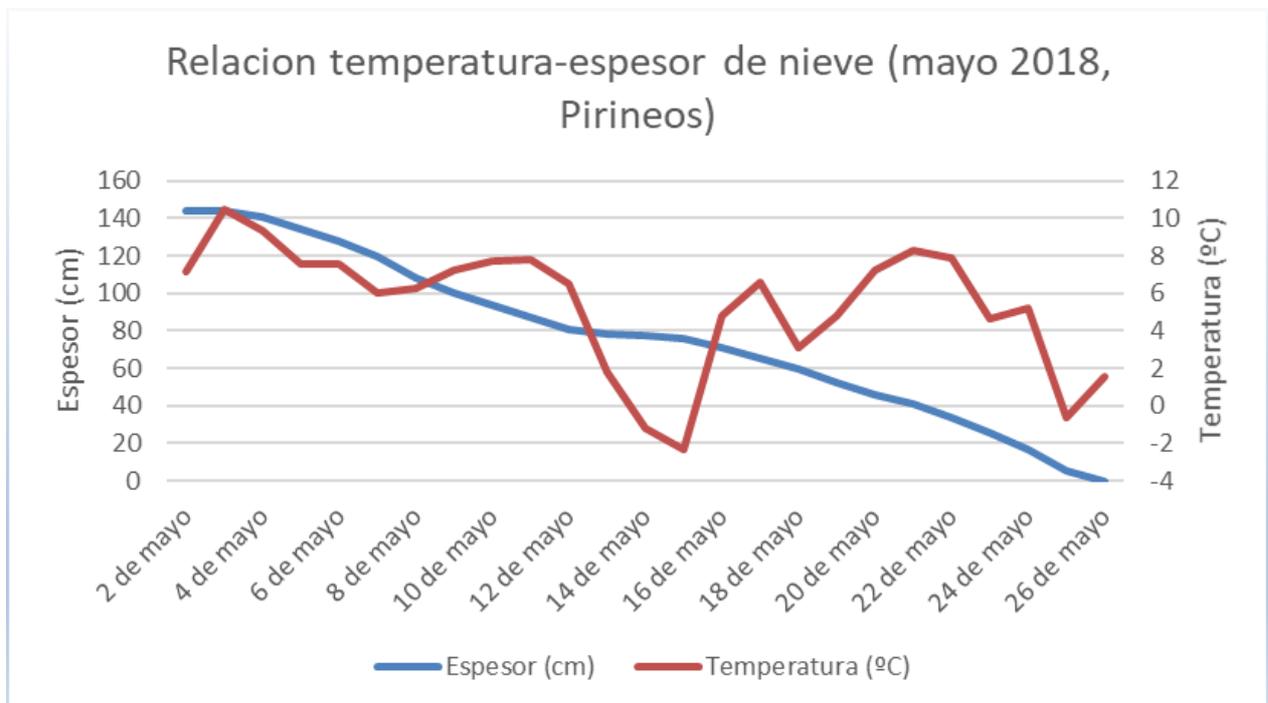


Figura 37 Relación entre la temperatura media de mayo y el espesor de nieve

La Figura 37 muestra cómo, al igual que el albedo, una relación entre temperatura y espesor de nieve. Se observa como las temperaturas por debajo de los 0°C minimizan la fusión, mientras

que las superiores a esta cifra la aceleran. Del día 3 de mayo, con una temperatura media de $-0,6^{\circ}\text{C}$, al 5 del mismo mes ($4,33^{\circ}\text{C}$), se aumenta la temperatura casi 5° , que en el tema de fusión nival es más que relevante al pasar en apenas 2 días de una temperatura en el límite de congelación a una superior. Es en estos días cuando comienza el primer descenso importante en el espesor de nieve, comenzando con 143 cm el día 3 hasta llegar a los 86 cm el día 11, donde se estabiliza por una brusca bajada de temperaturas y la precipitación de una fina capa de nieve polvo. El descenso de la temperatura media es en dos días de $4,93^{\circ}\text{C}$ a $-3,95^{\circ}\text{C}$, es decir, una reducción de 8°C . El descenso de las temperaturas provoca la estabilidad en el espesor de nieve, hasta que a partir del día 15 aumentan bruscamente y se pone en marcha por segunda vez el proceso de fusión. A partir de esta fecha, la temperatura media diaria no es inferior de los 4°C por lo que la fusión está garantizada.

- Degree Day Factor y albedo

En la Figura 38 se pone en relación el albedo con el Degree Day Factor⁷, un método por el que se permite observar si hay concordancia entre ambos factores. El Degree Day Factor mide la cantidad de nieve que se funde a lo largo del día en relación a la temperatura media del día, de tal forma que el cociente obtenido, indica los centímetros fundidos o sublimados por el aumento de cada grado centígrado.

En la Figura 38 se muestran gráficamente los valores de albedo y del Degree Day Factor del mes de mayo de 2018, donde las variaciones del primero junto con las temperaturas condicionan la pérdida de manto nival. No se observa una relación directa entre ambos factores, pero sí que se aprecia que el Degree Day Factor es negativo cuando el albedo se sitúa por encima de 0,65, como ocurre en el día 3 de mayo y entre el 13 y el 14 de mayo. Los días con valores de albedo entre 0,4 y 0,5 presentan una fusión media de entre 1 y 2 $\text{cm}/^{\circ}\text{C}$. El pico con mayor valor de Degree Day Factor se localiza en el día 10 de mayo con un valor de $3,5 \text{ cm}/^{\circ}\text{C}$ y un albedo de 0,39, uno de los más bajos de todo el registro. Esto se debe a que desde el 7 de mayo el grado de albedo rozaba los valores de 0,4 por lo que la absorción de energía en el manto de nieve fue clave para alcanzar ese nivel en el Degree Day Factor. El descenso tan brusco en el albedo es debido a la aparición del polvo sahariano en la parte superior de la columna de nieve.

⁷ Consultar: Degree day models. http://www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/numerical-ice-sheet-models/modelling-glacier-melt/#SECTION_3

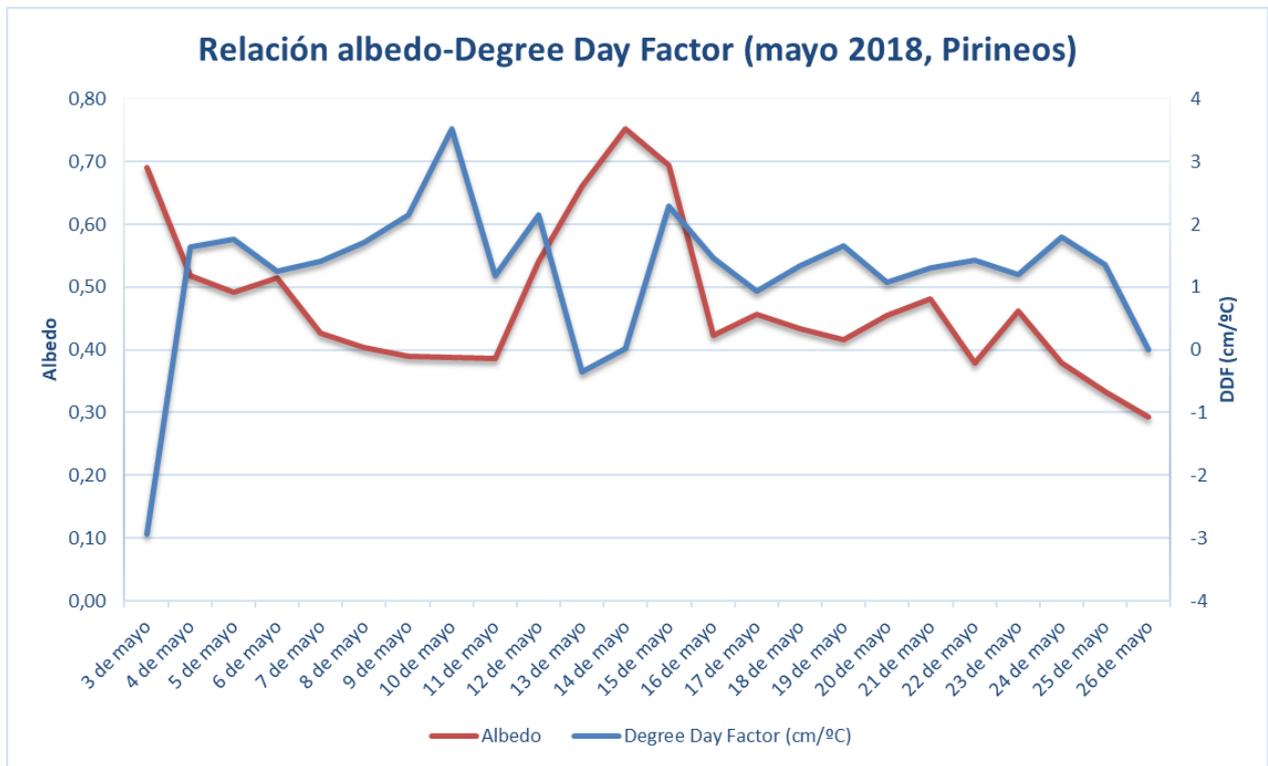


Figura 38 Relación entre el albedo y el Degree Day Factor (cm/°C)

4. Discusión de los resultados

A lo largo del documento se ha mencionado el año climatológicamente excepcional, con un volumen importante de nevadas y días nublados, que ha condicionado la obtención de resultados más rotundos. A pesar de las dificultades, los resultados obtenidos, tras el tratamiento de datos, son bastante interesantes.

Los resultados muestran claramente como las impurezas en la nieve, el polvo sahariano en el caso de este trabajo, aceleran considerablemente los procesos de fusión de la nieve. Estudios científicos previos analizan el comportamiento y la evolución de la nieve en relación a esta impureza. El evento del 6 de abril de 2018 tan excepcional ha permitido analizar el comportamiento de la columna de nieve ante eventos extraordinarios.

Los resultados sobre la reducción del albedo, en cuanto aparece el polvo sahariano, coinciden con diversos estudios científicos que habían medido el comportamiento del albedo en relación a la aparición de impurezas de polvo desértico en la nieve. Artículos como el de Painter et al. (2013) donde se muestra un modelo de simulaciones del albedo en las diferentes longitudes de onda del espectro.

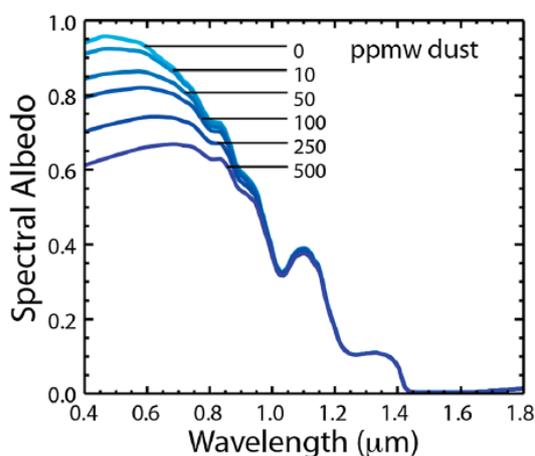


Figura 39 Relación entre el albedo y la concentración de polvo en la nieve. Fuente: Oainter et al. (2013)

Este modelo que se representa en el Figura 39 tiene

las diferentes firmas espectrales según la concentración de partículas por millón, de tal modo que, cuanto mayor es la cantidad mayor es la absorción de energía. Además, también se analiza como el aumento del tamaño, de lo que se conoce como grano de nieve, reduce el albedo en el espectro del infrarrojo próximo (0,7-1,5 µm) y en el infrarrojo medio (1,5-3 µm) o lo que es lo mismo, aumento de la absorción y, en consecuencia, mayor retención de energía calorífica. En el artículo de Di Mauro et al. (2015) también se explica como el aumento del tamaño del grano de nieve favorece a la fusión, por la mayor absorción de energía.

Otros artículos que corroboran la reducción de albedo con la aparición de esta impureza pueden ser el de Di Mauro et al. (2015) desarrollado en los Alpes, donde las mediciones se realizaron a través de imágenes satélite; o el de Dumont et al. (2017) donde analizan el albedo con diferentes impurezas en la nieve, así como su orientación geográfica, la pendiente o su contenido de agua líquida, también localizado en la cordillera de los Alpes.

Un estudio interesante es el de llevado a cabo por Skulles et al. (2015) donde se plasma el trabajo de 4 años en la cabecera del río Colorado, entre el 2010 y 2013. Los resultados de estos años de trabajos mostraron como la temperatura de la superficie nevada mezclada con partículas de polvo, y recibiendo la radiación solar, puede aumentar de 2° a 4°C con respecto a la superficie libre de contaminantes. Al igual, acelera la fusión de 0 a 6 días, en presencia de polvo, frente a los 5 a 18 en ausencia de él. Los resultados muestran como en las Figuras 27 y 29, la temperatura de los primeros centímetros en la columna es superior que el resto de mediciones, esto es consecuencia de la aparición del polvo sahariano del evento del 6 de abril a la superficie.

4.1. Cumplimiento de objetivos

En este apartado se tratará de explicar si los resultados cumplen o no los objetivos planteados para el desarrollo del proyecto.

- Objetivo 1: Controlar la deposición de polvo y otras impurezas

El fin de este objetivo era tener bajo control la deposición de las dos impurezas, polvo sahariano y Black Carbon. Se conocía de primera mano la cantidad de cada una de ellas en cada parcela, de modo que, a posteriori, y con la evolución del manto de nieve durante la campaña, se podría determinar el grado de influencia de cada una en el proceso de fusión. Se delimitaron dos parcelas de control, sin ningún tipo de impureza, para poder compararlas sin ningún contaminante.

La primera actualización sobre las impurezas ocurre a finales de enero, pocos días después de haber delimitado e incorporado de manera artificial las impurezas, llega un evento de polvo sahariano que deposita cantidades superiores a las esparcidas manualmente.

La segunda y más importante, es el evento de polvo sahariano del 6 de abril, cuando las cantidades de polvo que precipitan son extraordinarias (12 gramos por metro cuadrado). Este es el acontecimiento modificó el objetivo, teniendo que obviar los efectos del BC ante tal cantidad de polvo sahariano. La información y los resultados que se ha obtenido sobre el efecto de esta impureza en la fusión nival es muy relevante.

Hay que mencionar, que los espesores de nieve han llegado a superar los 3,5 metros debido a las continuas nevadas durante la campaña. Esto implica el esfuerzo de que, en cada salida a la zona de estudio, había que excavar una nueva trinchera ya que el viento y la nueva nieve habían cubierto la anterior, lo que condicionó días en los que solo se pudieron recoger datos de dos parcelas.

- Objetivo 2: Verificar la reducción de albedo con la aparición de impurezas

Para cumplir este objetivo se hicieron mediciones de albedo los días de salida de campo, tanto en zonas con nieve sin impurezas como en donde afloraba el polvo. El inconveniente viene a ser la excesiva nubosidad que presentaban los días de campaña. Esta provocaba que los resultados de las mediciones fuesen absurdos, debido a la radiación difusa se registraban valores más altos en la energía reflejada que en la recibida.

La solución a este problema se encontró en los instrumentos de la Estación Experimental de Izas, la cual contaba con un sensor medidor de radiación. Gracias a lo cual se permitía calcular el albedo. De haber contado con buenas condiciones meteorológicas, los resultados del albedo sobre superficie con impurezas de polvo habrían sido más precisos. No obstante, la gran frecuencia con la que registra los datos el sensor permite elaborar Figuras para cruzarlos con las demás variables.

La curva del albedo en la Figura 36, varía en relación al tipo de superficie, de modo que justo en los días que aparece el polvo sahariano, el albedo se reduce, mientras que en aquellos que la nieve no presenta impurezas, la curva de albedo es la típica de una superficie nevada, pero con nieve en metamorfismo. La nevada a mediados del mes de mayo y que cubrió la superficie de polvo, se ve reflejada a la perfección en la figura del albedo lo que corrobora la reducción del albedo cuando dicha impureza se descubre.

- Objetivo 3: Confirmar la relación entre la aparición de impurezas y la aceleración de la fusión

Se puede decir que este objetivo es la consecuencia del anterior. La aparición de las impurezas tiñe la nieve de un color más oscuro y, en consecuencia, propenso a la absorción de energía. Se demuestra claramente como la aparición del polvo influye notablemente: el 2 de mayo (día en que aparece el polvo sahariano) se contaba con 143 cm de espesor y el día 13 de mayo (día de la última nevada importante) se contaba con 78 cm, por lo que en 10 días se funden 65 cm de nieve, una media de 6,5 cm/día.

La superficie en contacto con la luz solar absorbe mayor radiación con las impurezas que sin ellas, provocando un aumento en la temperatura de la mezcla de nieve y polvo, haciendo que alcance con mayor rapidez el punto de maduración. Si se vuelve a sepultar el polvo sahariano por nuevas nevadas, como ocurrió a mediados de mayo, la fusión se reduce considerablemente hasta que vuelve a surgir el polvo por la fusión de la capa superior.

- Objetivo 4: Analizar la relación entre la temperatura y la fusión

En este caso, la temperatura está directamente relacionada con la fusión de la nieve, como se muestra en la Figura 37. Las temperaturas superiores a 0° C facilitan la fusión de la nieve y en la gráfica se representan perfectamente, ya que cuando hay un aumento de temperaturas, el espesor de la nieve se reduce, al igual que si hay un descenso por debajo de los 0° C la fusión se reduce o se detiene.

- Objetivo 5: Comprobar la relación entre densidad e impurezas en la nieve

Como ha quedado demostrado en las Figuras 30, 31, 32, 33 y 34, las impurezas en la nieve, sean del tipo que sean, no tienen ningún tipo de relación con la densidad. En la Figura 33, por ejemplo, cuando aparecen las partículas de polvo y BC la densidad incluso se reduce, por lo que este objetivo muestra la inexistente relación entre cantidad de impurezas y aumento en la densidad.

En definitiva, los objetivos planteados han sido cumplidos pese a las dificultades que trajo consigo una campaña con grandes precipitaciones, acompañadas de dos eventos extraordinarios de polvo sahariano. El único inconveniente fue que no se pudo estimar la influencia del Black Carbon,

5. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo ha estado marcado por el año climatológico tan excepcional que se vivió, no solo por las grandes y continuas nevadas que cubrieron el Pirineo, sino que también, los dos eventos de polvo sahariano han condicionado enormemente su estudio. A pesar de las injerencias del clima, los resultados son positivos y pueden ser de utilidad para futuros trabajos.

El principal objetivo del proyecto era conocer si las impurezas en la nieve afectaban directamente a la aceleración de la fusión de la nieve, y los resultados han confirmado esta hipótesis. El albedo y las temperaturas tienen un papel importante en la fusión del manto de nieve como también se ha probado, y si a ello se le añade la aparición de impurezas, la duración del manto de nieve será muchísimo menor.

El cambio climático y los efectos de reducción de precipitaciones a la mitad en el Pirineo son ya un problema, pero si a eso se le añade la llegada de un evento de polvo sahariano, la gravedad del problema aumentará con creces. En las Figuras 33 y 34, se observa como 140 cm de nieve se funden en 24 días, por lo que, si se pone en la situación de las próximas décadas con menor columna de nieve y temperaturas medias más elevadas, añadiéndole un evento de polvo como el analizado en este estudio, el manto de nieve durará mucho menos que el de esta campaña.

El estudio puede servir de utilidad a la Administración para la gestión de recursos hídricos, que podrá tomar medidas para prevenir posibles avenidas por rápido deshielo y ahorrar en gastos por los efectos de las inundaciones.

Las estaciones de esquí, como se ha explicado al comienzo del documento, son un punto clave en la economía de Aragón, no solo las pistas en sí mismas, sino toda la actividad en torno a los valles (restauración, alojamiento, servicios relacionados, etc.). Esta actividad es completamente dependiente de las condiciones climáticas, que cada año pueden variar, por ello, la precipitación de polvo sahariano puede llegar a ser catastrófica si no se actúa rápidamente. Debido a que la fusión se verá acelerada gracias a esta impureza y que puede echar por tierra una temporada de esquí, lo más recomendable será proteger la nieve de las pistas cubriéndola con nieve limpia, para ello los cañones de nieve artificial servirán para producir nueva nieve, siempre y cuando la temperatura lo permita, y ocultar el polvo sahariano un mínimo de 10 cm que es lo que penetra la luz solar en la nieve según Dingman (2002).

La aceleración de la fusión puede provocar aludes por la inestabilidad y fragilidad del manto si existe la pendiente óptima, por lo que los esquiadores de travesía deberán tener en cuenta este factor para evitar riesgos.

La desaparición de los glaciares pirenaicos es una realidad y un hecho prácticamente irreparable. Si a ello se le suma la llegada de estas impurezas, los días que quedan para disfrutar de tales maravillas, están contados.

Los científicos argumentan que el cambio global es irreversible pero todavía mitigable. Son muchos los efectos que se estiman que pueden venir en las próximas décadas, como sequías, aumento de los fenómenos extremos, pérdida de biodiversidad... pero uno de los que tiene relación con este trabajo es el de la desertificación. Esta avanza a ritmos descontrolados, de hecho, hay estudios argumentando que el 80% de España está en riesgo de convertirse en desierto en este siglo⁸. El estudio de Painter et al. (2007) se explica como el cambio climático está acelerando el proceso de desertificación. Por lo tanto, a mayor superficie desértica, mayor facilidad de que las partículas de polvo estén presentes en la atmósfera y en consecuencia, más probables serán los eventos como el del 6 de abril de 2018.

Herramientas como la Teledetección, pueden servir de utilidad para conocer la cantidad de partículas contaminantes hay depositadas en la nieve, gracias a la reflexión de la superficie. Con ello es posible estimar el nivel de concentración de impurezas y realizar simulaciones de fusión de nieve teniendo en cuenta otros factores como la temperatura y aplicando diferentes modelos de fusión.

En definitiva, el cambio climático es un hecho y los efectos pueden traer graves consecuencias. Con este trabajo se ha pretendido servir de ayuda para explicar los efectos de un recurso hídrico más que importante en la comunidad de Aragón.

⁸ Consultar: El 80% de España, en riesgo de convertirse en desierto este siglo por el cambio climático.
https://www.eldiario.es/sociedad/Espana-riesgo-convertirse-desierto-siglo_0_624337848.html

6. Bibliografía

- Cuadrat, J. M., Pita, M. F. (2011) *Climatología*. Madrid: Ediciones Cátedra.
- Di, M. B., Fava, F., Ferrero, L., Garzonio, R., Baccolo, G., Delmonte, B., & Colombo, R. (June 27, 2015). *Mineral dust impact on snow radiative properties in the European Alps combining ground, UAV, and satellite observations*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120, 12, 6080-6097.
- Dingman, L. (2002) *Physical Hydrology*. New Jersey. Prentice Hall.
- Dumont, M., Lejeune, Y., Morin, S., Arnaud, L., Picard, G., Libois, Q., Voisin, D., Libois, Q. (2017). *In situ continuous visible and near-infrared spectroscopy of an alpine snowpack*. Cryosphere, 11, 3, 1091-1110.
- Herrero Lantarón, J. (2007). *Modelo físico de acumulación y fusión de la nieve: Aplicación en Sierra Nevada (España): tesis para la obtención del título del doctor por las Universidades de Granada, Córdoba y Málaga*. Granada: Grupo de Puertos y Costas, Universidad de Granada
- Lugo, H. J. I., & Aguayo, C. J. E. (1989). *Diccionario geomorfológico: Con equivalentes de los términos de uso más común en alemán, francés, inglés y ruso*. México, D.F: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Neff, J. C., Ballantyne, A. P., Farmer, G. L., Mahowald, N. M., Conroy, J. L., Landry, C. C., Overpeck, J. T., Reynolds, R. L. (2008). *Increasing eolian dust deposition in the western United States linked to human activity*. Nature Geoscience, 1, 3, 189-195.
- Painter, T. H., Barrett, A. P., Landry, C. C., Neff, J. C., Cassidy, M. P., Lawrence, C. R., McBride, K. E., Farmer, G. L. (2007). *Impact of disturbed desert soils on duration of mountain snow cover*. Geophysical Research Letters, 34, 12.)
- McGinn, R. (n.d.). *Degree-day snowmelt runoff experiments; Clear Lake Watershed, Riding Mountain National Park*. Prairie Perspectives: Geographical Essays, 15.
- Painter, T. H., Deems, J. S., Belnap, J., Hamlet, A. F., Landry, C. C., & Udall, B. (2010). *Response of Colorado River runoff to dust radiative forcing in snow*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107, 40, 17125-17130.
- Painter, T. H., Seidel, F. C., Bryant, A. C., McKenzie, S. S., & Rittger, K. (September 16, 2013). *Imaging spectroscopy of albedo and radiative forcing by light-absorbing impurities in mountain snow*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118, 17, 9511-9523.
- Steltzer, H., Landry, C., Painter, T., Anderson, J., & Ayres, E. (2009). *Biological consequences of earlier snowmelt from desert dust deposition in alpine landscapes*. Proceedings Of The National Academy Of Sciences, 106(28), 11629-11634.

- Skiles, S. M. K., Painter, T. H., Belnap, J., Holland, L., Reynolds, R. L., Goldstein, H. L., & Lin, J. (2015). *Regional variability in dust-on-snow processes and impacts in the Upper Colorado River Basin*. *Hydrological Processes*, 29, 26, 5397-5413.
- Tuzet, F., Dumont, M., Lafaysse, M., Lejeune, Y., Charrois, L., Morin, S., Nabat, P. (2017). *A multilayer physically based snowpack model simulating direct and indirect radiative impacts of light-absorbing impurities in snow*. *Cryosphere*, 11, 6, 2633-2653.
- Worster, D. (2012). *Dust Bowl: The southern Plains in the 1930s*. New York: Oxford University Press.
- Williams, W. E., Gorton, H. L., & Vogelmann, T. C. (2003). *Surface gas-exchange processes of snow algae*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100, 2, 562-6.

Recursos web

- Barcelona Dust Forecast Center. (s.f.) Recuperado el 11 de noviembre de 2018 de <https://dust.aemet.es/>
- Científicos plantean que el polvo sahariano en el Pirineo favorece las crecidas del Ebro. (s.f.) Recuperado el 13 de noviembre de 2018, de https://www.eldiario.es/aragon/sociedad/Cientificos-confirman-sahariano-Pirineo-Ebro_0_782172319.html
- Davies, B. (2019). *Degree day models: Modelling glacier melt* [online] Disponible en: http://www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/numerical-ice-sheet-models/modelling-glacier-melt/#SECTION_3 [Accessed 8 Jun. 2019].
- El 80% de España, en riesgo de convertirse en desierto este siglo por el cambio climático. (s.f.) Recuperado el 10 de octubre de 2018, de https://www.eldiario.es/sociedad/Espana-riesgo-convertirse-desierto-siglo_0_624337848.html
- Polvo y arena del Sahara sobre la nieve de Europa del Este. (s.f.) Recuperado el 14 de octubre de 2018, de <https://www.tiempo.com/ram/416111/polvo-arena-del-sahara-la-nieve-europa-del-este/>
- Nieve rosa. (s.f.) Recuperado el 14 de octubre de 2018, de <https://www2.palomar.edu/users/warmstrong/plaug98.htm>
- Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (s.f.) Recuperado el 8 de septiembre de 2019, de <https://www.opcc-ctp.org/es>
- Riegos del Alto Aragón. (s.f.) Recuperado el 15 de septiembre de 2018, de <http://riegosaltoaragon.es/>

- Slow Driving Aragón (s.f.) Recuperado el 15 de octubre de 2018, de <http://www.slowdrivingaragon.com/>
- WAD | World Atlas of Desertification. (s.f.) Recuperado el 10 de septiembre de 2019 de <https://wad.jrc.ec.europa.eu/>