



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Modelación de albedo de nieve contaminada con Black Carbon mediante OptiPar

Memoria de Título presentada por

Karina Meza Arenas

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Raúl Pedro Flores Audibert

Noviembre de 2023



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**MODELACIÓN DE ALBEDO DE NIEVE CONTAMINADA CON BLACK
CARBON MEDIANTE OPTIPAR**

AUTOR:

KARINA MEZA ARENAS

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Raúl Pedro Flores Audibert

.....

.....

.....

Valparaíso, Chile, Noviembre de 2023

MODELACIÓN DE ALBEDO DE NIEVE CONTAMINADA CON BLACK CARBON MEDIANTE OPTIPAR

Karina Meza Arenas¹, Raúl Flores Audibert¹.

1 Universidad Técnica Federico Santa María.

Resumen

La deposición de contaminantes atmosféricos sobre la nieve provoca una reducción del albedo de esta, acelerando su derretimiento y poniendo en riesgo la disposición y gestión de los recursos hídricos para uso humano. Por ello, es importante que los modelos hidrológicos se actualicen al nuevo escenario causado por el cambio climático. Una manera de calcular el albedo de nieve contaminada es a través de softwares, tales como OptiPar y SNICAR.

En esta investigación, se modela el albedo de nieve contaminada con Black Carbon extraído del satélite CAMS, determinando los parámetros de entrada de la simulación mediante literatura y modelando ciertas variables relevantes; a través de OptiPar se obtiene el tamaño de grano de nieve, espesor del manto de nieve, entre otros parámetros. Esta modelación se compara con datos medidos en terreno de albedo de las cuencas chilenas Río Juncal y Río Yeso. Los resultados indican que OptiPar da valores más exactos que SNICAR.

Finalmente, se busca encontrar una relación entre albedo modelado por OptiPar y el albedo medido en terreno en ambas cuencas con el fin de precisar aún más el albedo real que existe. Se encuentra que la relación que mejor se ajusta y que da resultados con más coherencia teórica es exponencial, y se entregan algunas recomendaciones para trabajos futuros, como tener en cuenta la resolución del satélite a usar.

Palabras claves: Albedo, Black Carbon, modelación, OptiPar.

Agradecimientos

Al llegar al final de mi etapa universitaria, agradezco a Dios por darme la capacidad e inteligencia para sacar adelante esta carrera. A mí, por la perseverancia y esfuerzo puestos todos estos años. A toda mi familia, especialmente a mis padres, quienes siempre han estado conmigo a pesar de la distancia, me han ayudado y apoyado a alcanzar mis metas.

Agradezco también a mi profesor guía, quien fue parte de mi formación y en cada reunión siempre tuvo un comentario o idea iluminadora para seguir avanzando. A mi pololo y amigos de la universidad, quienes fueron mi compañía e hicieron que este proceso fuese agradable y bonito, me llevaré por siempre los buenos recuerdos. Entre ellos destaco el aporte de Mauricio Barrios (Piero), quien con sus amplios conocimientos en programación fue una gran ayuda en la elaboración de este trabajo.

Finalmente, agradezco al Proyecto ANID ACT210021 “Interactions between environmental compartments and their impact on the Andean ecohydroshpere under conditions of climate change” por proporcionar los datos de albedo en terreno, sin los cuales esta memoria no hubiese sido posible; a Diego Pacheco Ferrada, quien facilitó la última versión de OptiPar, y a Karina Vallejos Aravena, quien con buena voluntad me enseñó e instruyó sobre información satelital.

Índice de Contenidos

1	Introducción	5
2	Objetivos	6
3	Marco Teórico	6
3.1	Albedo	6
3.2	Black Carbon	7
3.3	SNICAR	7
3.4	OptiPar	7
4	Metodología	14
5	Lugar de estudio	14
5.1	Subsubcuenca Río Juncal Antes Junta Estero Juncalillo y Junta Río Blanco	14
5.2	Subsubcuenca Río Yeso	15
6	Datos satelitales	16
7	Datos de albedo medidos en terreno	18
8	Tiempo de estudio	23
9	Modelación: Definición de parámetros	23
10	Resultados y Discusión	28
10.1	Factor de Asimetría	28
10.2	Tamaño de Grano	29
10.3	Método de Cálculo	30
10.4	Espesor del Manto Nival	31
10.5	Comparación entre OptiPar y SNICAR	32
10.6	Relación entre albedo medido y albedo modelado	34
11	Conclusiones	37
12	Referencias	38
13	Anexos	40
13.1	Procedimiento de Modelación en OptiPar	40

1 Introducción

En las últimas décadas el cambio climático se ha presentado como una amenaza para el planeta. Este cambio se debe, en gran medida, a las partículas emitidas a la atmósfera en los procesos industriales, mineros y de transporte, provocando problemas en la salud de las personas a través de la inhalación de partículas pequeñas, o mediante su deposición en la superficie terrestre (Mariraj Mohan, 2015) a través de ráfagas de viento y eventos de neblina. Entre estas partículas destaca el Black Carbon, el cual proviene de procesos de combustión incompleta, tiene propiedades ópticas que dependen de su tamaño, composición, forma y de la longitud de onda de la luz incidente, y contribuye al calentamiento en la atmósfera y en la superficie en la que se encuentra depositado; en efecto, estudios han demostrado que el Black Carbon promueve a calentar el planeta dos o tres veces más que el CO₂ (Hadley & Kirchstetter, 2012), y en general, absorbe la radiación solar de manera más eficiente que otros contaminantes (como el polvo) al reposarse en una superficie.

La superficie más sensible a los efectos negativos de la deposición del Black Carbon es la nieve, debido a su alta capacidad de reflexión de radiación incidente, cuando estos contaminantes se sitúan sobre la nieve absorben tanto la radiación solar que incide sobre ella como la que es reflejada desde la superficie (Rubio & Lapuerta, 2018). Esto produce una reducción del albedo de nieve, que finalmente, termina por modificar el ciclo hidrológico aumentando la temperatura de la criósfera contaminada y acelerando el proceso de deshielo (Hansen & Nazarenko, 2003), que afecta los recursos hídricos en la operación de embalses aguas abajo, riego y control de crecidas e inundaciones. En Asia central, en 1950, siguiendo una práctica antigua, la nieve se oscureció intencionalmente con polvo de carbón para acelerar el derretimiento de los glaciares y aumentar el suministro de agua de riego. Hoy en día, el derretimiento de los glaciares causado por impurezas debido a la contaminación de la nieve con trazas de Black Carbon no es intencionado y es motivo de preocupación (Hadley & Kirchstetter, 2012). Por ende, es de gran importancia conocer el valor real del albedo de mantos nivales contaminados para incluirlo en modelos hidrológicos, más aún con los eventos que han ocurrido en los últimos tiempos, particularmente en la zona central de Chile, que han puesto en evidencia la urgencia de actualizar los modelos al cambio climático.

En la actualidad este problema se ha enfrentado de diversas maneras, la más certera y precisa es la medición en terreno, que incluyen estudios de teledetección que emplean un espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS); sin embargo, estos procedimientos son complicados y costosos. Otros métodos que se han utilizado para estimar el albedo de nieve contaminada es la modelación computacional utilizando conceptos de transferencia de energía, destaca el modelo SNICAR (Flanner et al., 2007), siendo el más utilizado para estos estudios por su simplicidad, y OptiPar (González-Correa & Lapuerta, 2021), que es un software orientado a la investigación. Además, recientemente se ha realizado un estudio que compara ambos modelos con datos de albedo medidos en terreno en el sector de El Portillo, Chile, utilizando datos satelitales de baja resolución espacial (Venegas & Flores, 2022).

En esta investigación se plantea modelar el albedo de nieve contaminada con Black Carbon a través de los softwares OptiPar y SNICAR y realizar una comparación entre ambos, utilizando imágenes satelitales de alta resolución espacial, con el fin de incluir esta nueva variable en el análisis.

2 Objetivos

Objetivo general

El objetivo general es obtener el valor de albedo para mantos de nieve contaminados en la cuenca del Río Juncal antes Junta Estero Juncalillo y Junta Río Blanco y en la cuenca Río Yeso, mediante el uso del modelo computacional OptiPar y concentraciones deposicionales de Black Carbon obtenidas desde plataformas satelitales.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos de esta investigación son:

- Obtener valores de entrada y de modelación para el modelo OptiPar, considerando los métodos más apropiados del programa para las cuencas en estudio.
- Comparar los valores de albedo obtenidos con OptiPar con los datos medidos en terreno y el modelo SNICAR.
- Establecer una correlación entre albedo medido y albedo modelado mediante imágenes satelitales, con el fin de representar lo mejor posible la información real existente en terreno.

3 Marco Teórico

Se definen los siguientes conceptos:

3.1 Albedo

El albedo de una superficie se define de manera simplista como el cociente entre la energía o radiación reflejada y la incidente, según la Ecuación (1).

$$Albedo = \frac{Energía\ reflejada}{Energía\ incidente} \quad (1)$$

Por su definición, es un parámetro adimensional que toma valores entre 0 y 1, siendo 0 un cuerpo negro que absorbe toda la radiación incidente, y 1 un cuerpo blanco que refleja toda la radiación incidente. La nieve se encuentra entre las superficies naturales más reflectantes de la Tierra (Hadley & Kirchstetter, 2012).

El albedo depende de varios parámetros, tales como el tamaño y la forma del grano (Giddings & LaChapelle, 1961), espesor del manto (Warren & Wiscombe, 1980), ángulo cenital (Bohren & Huffman, 1983), densidad del manto (Warren, 1982), nubosidad (Liou, 2002), pendiente de la superficie (Dumont et al., 2017), etc.

El albedo medio o albedo de banda ancha (broadband albedo) de la nieve, se puede obtener como la relación entre la radiancia reflejada y la irradiancia solar, ambos calculados por integración sobre todo el rango espectral, según la Ecuación (2) (Lapuerta et al., 2022).

$$\bar{\omega} = \frac{\int I_{rad} d\lambda}{\int I_{irrad} d\lambda} = \frac{\sum_i^n I_{rad_i}(\lambda_i - \lambda_{i-1})}{\sum_i^n I_{irrad_i}(\lambda_i - \lambda_{i-1})} \quad (2)$$

- Donde
- $\bar{\omega}$: Albedo de banda ancha.
 - I_{rad} : Radiancia reflejada por la nieve.
 - I_{irrad} : Irradiancia solar.
 - λ : Longitud de onda.

3.2 Black Carbon

El Black Carbon corresponde a partículas pequeñas que se generan de una combustión incompleta de materiales orgánicos como la madera, el carbón o los combustibles. Su composición depende de la zona y de la combustión de la que proceda (calderas, motores de combustión interna, incendios forestales, etc.), aunque aproximadamente y de manera general, se encuentra que la composición es de un 95% de carbono, 5% de oxígeno y menos del 1% de hidrógeno. Además, el Black Carbon se caracteriza por ser un material absorbente de energía (Rubio & Lapuerta, 2018).

Las partículas de Black Carbon tienen tamaños nanométricos (~ 30 nm) y son casi esféricos (Lapuerta et al., 2022), por lo que permanecen en suspensión por periodos de tiempo de aproximadamente una semana. En ese tiempo, las partículas logran viajar grandes distancias antes de depositarse en el terreno, por ende, las regiones que emiten estas partículas no necesariamente son las que sufren mayores consecuencias medioambientales. La deposición de Black Carbon puede ser seca o húmeda, por ejemplo, sobre mantos de nieve, hielo o cuerpos de agua (Rubio & Lapuerta, 2018).

Cuando el Black Carbon se deposita sobre la nieve, aumenta la absorción de la superficie y disminuye la radiación reflejada, reduciendo así el albedo de la nieve y aumentando la temperatura media del manto de nieve, acelerando el proceso de deshielo (Hansen & Nazarenko, 2003). Se ha comprobado que la presencia de Black Carbon en la nieve puede disminuir su albedo en la región visible y ultravioleta desde un 5 a un 10% (Clarke & Noone, 1985).

3.3 SNICAR

El modelo SNICAR (Flanner et al., 2007) fue desarrollado por Mark Flanner y otros autores en el año 2007. Su nombre es la abreviación de Snow, Ice and Aerosol Radiative. Actualmente, es uno de los modelos más utilizados a nivel mundial para el albedo de nieve, utiliza la teoría de Mie (Warren & Wiscombe, 1980) y la solución multicapa de dos flujos (Toon et al., 1989).

La última versión del modelo fue desarrollada en el año 2021, denominada SNICAR-ADv3.0 (Flanner et al., 2021), incorpora irradiancias espectrales superficiales y actualiza las propiedades ópticas de componentes absorbentes de la luz. Los parámetros de entrada más importantes para realizar la modelación son el tamaño del grano, espesor de capa nival y concentración de contaminantes sobre la nieve, además también se considera como parámetros la forma del grano y el ángulo de incidencia de la radiación (Constantin et al., 2020).

La modelación mediante SNICAR ha dado buenos resultados en estudios realizados en Chile, como es el realizado por Cereceda-Balic et al. (2018) en Portillo, en el que se observa un buen ajuste entre las 10:00 y 17:30 horas, concordando cualitativamente con ecuaciones teóricas (Giddings & LaChapelle, 1961). Dentro de ese rango horario, la mayor diferencia entre los datos modelados y medidos es de 0,03 unidades a las 14:30 horas, que se debe a una disminución de la radiación incidente producto de la nubosidad.

3.4 OptiPar

El modelo OptiPar (González-Correa & Lapuerta, 2021) es un programa que se utiliza para calcular las propiedades ópticas de las partículas expuestas a una determinada fuente de luz. Este software está desarrollado en Matlab, en la versión R2022a y está orientado a la investigación, ofrece una amplia variedad de métodos de cálculo, permitiendo la comparación entre ellos. En la Figura 1 se puede apreciar la pantalla de inicio del programa.

También permite el estudio de materiales como agua y hielo, Black Carbon, grafito y diamante. Se diferencia de otros programas en que considera un modelado geométrico de las partículas para obtener las propiedades ópticas finales, como el tomar en cuenta la morfología de las partículas, esto aumenta la precisión de los resultados ya que se permite introducir más parámetros para caracterizar a los aglomerados (González-Correa & Lapuerta, 2021).



Figura 1. Pantalla de inicio de OptiPar.

Respecto a las aplicaciones del programa, en el estudio realizado por Venegas & Flores (2022) se realizaron distintas modelaciones con los diferentes parámetros y métodos de cálculo que ofrece OptiPar, y se observó que, en cada una de esas modelaciones, OptiPar se ajusta mejor que SNICAR para la representación de albedo de nieve contaminada con Black Carbon, reduciendo considerablemente el error porcentual entre lo modelado y lo medido en terreno.

A continuación, se definen ciertos conceptos relevantes para la modelación en OptiPar, algunos de ellos constituyen parámetros de entrada, y otros, conceptos importantes para entender el fenómeno que está siendo modelado.

Fuente de luz

El primer paso para modelar el albedo de nieve en OptiPar es seleccionar la fuente de luz. Entre las opciones se encuentran:

- Espectro solar.
- Halógena.
- Nueva fuente de luz.

Para seleccionar una nueva fuente de luz, es necesario importar los datos correspondientes a partir de una hoja de cálculo de Excel.

De cualquier modo, la fuente de luz seleccionada debe estar en términos de Irradiancia, en unidades de $[W/m^2nm]$, en función de la longitud de onda, en unidades de $[nm]$.

Índice de refracción complejo

El índice de refracción complejo describe cómo se propaga la luz a través de un medio. Esto se expresa a través de la Ecuación (3), en la que la parte real de este número complejo (n) cuantifica cuánto se reduce la velocidad de la luz dentro del medio, y la parte imaginaria (k) describe la atenuación que experimenta la luz cuando se propaga a través del material (Rubio & Lapuerta, 2018).

$$m = n - ik \quad (3)$$

Para el índice de refracción de la nieve, el programa cuenta con métodos como el de Warren & Brandt (Warren & Brandt, 2008) y el de Irvine & Pollack (Irvine, 1964). El primero de estos se utiliza cuando el material se encuentra en estado de hielo, y el segundo cuando se encuentra en estado líquido. Por otra parte, para el índice de refracción del Black Carbon se tienen métodos como el de Chang &

Charalampopoulos (Chang & Charalampopoulos, 1990), Liu & Bescond (Liu et al., 2015) y el modelo de dispersión propuesto por Stull & Plass (Stull & Plass, 1960).

Factor de asimetría

El factor de simetría (g) permite conocer la dispersión de la radiación incidente dentro de un material. Corresponde a un valor adimensional que se encuentra en el rango entre $[-1,1]$ (Rubio & Lapuerta, 2018). Cuando el factor de asimetría es menor que 0, significa que la dispersión de luz es más bien hacia atrás, entendiéndose como dispersión hacia atrás a la dispersión que se produce en el sentido opuesto de la radiación incidente; y cuando el factor de asimetría es mayor que 0, significa que la dispersión de luz es principalmente hacia delante, es decir, que la dispersión se produce en el mismo sentido de la radiación incidente. Esto se ejemplifica en la Figura 2.

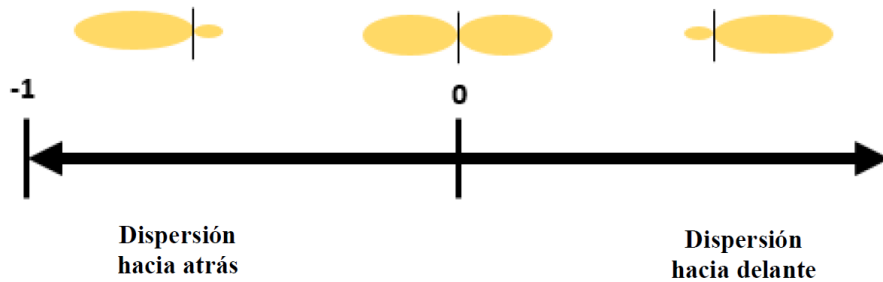


Figura 2. Factor de asimetría.

Para el factor de asimetría, OptiPar ofrece modelar con los factores propuestos por Debye (Bohren & Huffman, 1983), Macke (Macke et al., 1996) y el factor de asimetría de Yang (Yang & Fu, 2009). De estas tres, la más precisa para partículas esféricas es la expresión de Debye. Sin embargo, las partículas pueden ser no esféricas y, en este caso se pueden utilizar las expresiones de Macke y Yang que incluyen algunos parámetros de ajuste para partículas no esféricas (Lapuerta et al., 2022).

Dimensión fractal

La dimensión fractal describe cómo el objeto geométrico llena el espacio en el que está inmerso, midiendo la irregularidad tridimensional de un aglomerado en el espacio (Rubio & Lapuerta, 2018).

La dimensión fractal puede tomar valores enteros o fraccionarios, para aglomerados compactos este valor tiende a tres, mientras que para aglomerados cuya estructura sea similar a una cadena alargada o una línea, la dimensión fractal tiende a la unidad.

Densidad de la nieve

Existe una diferencia entre la densidad de la nieve que se encuentra a nivel de superficie y la densidad de la nieve que se encuentra al interior del manto. La densidad de la nieve se puede calcular en función de la profundidad del manto de nieve y densidad de la nieve en la superficie (Pomeroy & Gray, 1995), según lo expresado en la Ecuación (4).

$$\rho = \rho_s - \frac{20470}{d} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{67.3}\right) \right] \quad (4)$$

- Donde
- ρ : Densidad de la nieve [kg/m^3].
 - ρ_s : Densidad superficial de la nieve [kg/m^3].
 - d : Profundidad del manto de nieve [cm].

Ángulo cenital

El ángulo cenital representa la posición del sol con respecto a la posición del observador o punto de referencia. Este puede tomar valores entre 0° y 90° , un valor de 0° quiere decir que el sol está situado sobre la vertical del observador, mientras que un valor de 90° representa que el sol se encuentra en la horizontal del observador, tal como se muestra en la Figura 3. El ángulo complementario del cenital es el ángulo de elevación.

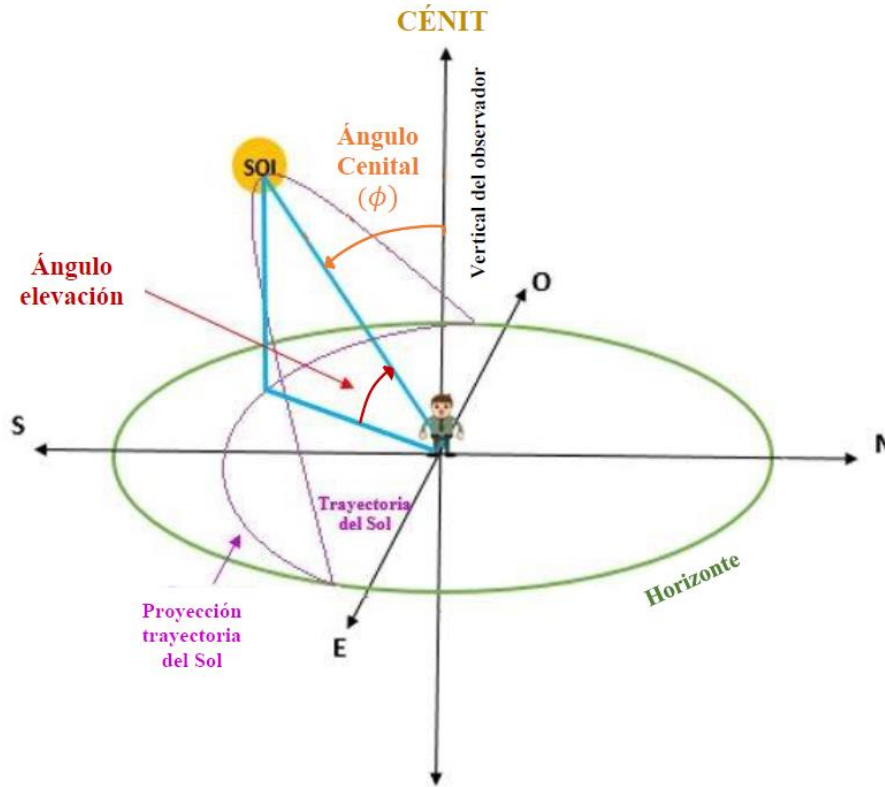


Figura 3. Esquema representativo del ángulo cenital.

El ángulo cenital influye en el albedo de una superficie porque la radiación no incide de la misma forma para todos los ángulos.

Para calcular el ángulo cenital se cuenta con el siguiente procedimiento:

1. Calcular el parámetro LSTM.

$$LSTM = 15^\circ \Delta T_{UTC} \quad (5)$$

- Donde
- LSTM: Meridiano de la hora estándar local.
 - ΔT_{UTC} : Diferencia de la hora local con respecto al tiempo universal UTC.

2. Calcular el parámetro EoT.

$$EoT = 9.87 \sin(B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad (6)$$

$$B = \frac{360}{365} \cdot (d - 81) \quad (7)$$

- Donde
- EoT: Ecuación del tiempo.
 - d: Número de días desde que inicia el año.

3. Calcular el parámetro TC.

$$TC = 4 \cdot (Longitud - LSTM) + EoT \quad (8)$$

- Donde
- TC: Factor de corrección del tiempo, medido en minutos.
 - Longitud: Longitud del punto de referencia u observador.

4. Calcular el parámetro LST.

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \quad (9)$$

- Donde
- LST: Hora local solar en el punto en que el sol está más alto del cielo.
 - LT: Hora local del punto.

5. Calcular el factor HRA.

$$HRA = 15^\circ (LST - 12) \quad (10)$$

- Donde
- HRA: Factor hora ángulo, describe el número de grados que el sol se desplaza por el cielo.

6. Calcular el ángulo de elevación.

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(HRA)] \quad (11)$$

- Donde
- α : Ángulo de elevación.
 - δ : Ángulo de declinación, depende del día del año.
 - φ : Latitud del punto de referencia u observador.

7. Calcular el ángulo cenital.

$$\zeta = 90^\circ - \alpha \quad (12)$$

- Donde
- ζ : Ángulo cenital, en grados.

En caso de que la pendiente de la superficie sea considerable, una manera de corregir el ángulo cenital es sumar (o restar) el ángulo de inclinación de la superficie al de elevación, en la dirección de máxima pendiente (Lapuerta et al., 2022).

Profundidad óptica

La profundidad óptica se utiliza para diferenciar entre un manto de nieve fino y un manto de nieve considerado semi-infinito. La profundidad óptica sirve para describir cuánto penetra la radiación incidente antes de ser absorbida, es decir, indica la capacidad de las partículas para atenuar la radiación a una cierta longitud de onda.

Para calcular la profundidad óptica se requieren parámetros como la densidad de la nieve, el espesor del manto nevado, el radio del grano, la densidad del hielo ($917 \text{ [kg/m}^3\text{]})$ y la eficiencia de extinción (Warren & Wiscombe, 1980). Esta última se define como la suma de la eficiencia de absorción y de dispersión, se calcula con la teoría de Mie y se encuentra detallada en el libro de Liou (Liou, 2002).

Espesor del manto nival

Las opciones disponibles para modelar el espesor del manto nival en OptiPar son de una profundidad determinada y mantos semi-infinitos. Según (Chen et al., 2014), se puede considerar un manto como semi-infinito si su espesor es mayor a 30 [cm]. En caso de elegir un manto con profundidad finita determinada, se debe ingresar un albedo de referencia para la superficie que se encuentre debajo de la nieve; por otro lado, al seleccionar un manto semi-infinito, la influencia de mantos inferiores a la nieve deja de tener relevancia y se analiza el albedo en función de otros parámetros.

Métodos de cálculo

Para obtener el albedo de mantos de nieve contaminados, existen las metodologías de Rayleigh y la de Mie, ambos métodos permiten conocer la dispersión que tiene la luz y la radiación (González-Correa & Lapuerta, 2021).

La metodología de Rayleigh presenta la misma forma para la dispersión de la luz tanto hacia adelante como hacia atrás (factor de asimetría nulo), mientras que la metodología de Mie muestra que la dispersión de la luz es mayor hacia adelante que hacia atrás (factor de asimetría positivo). Esto se ejemplifica en la Figura 4.

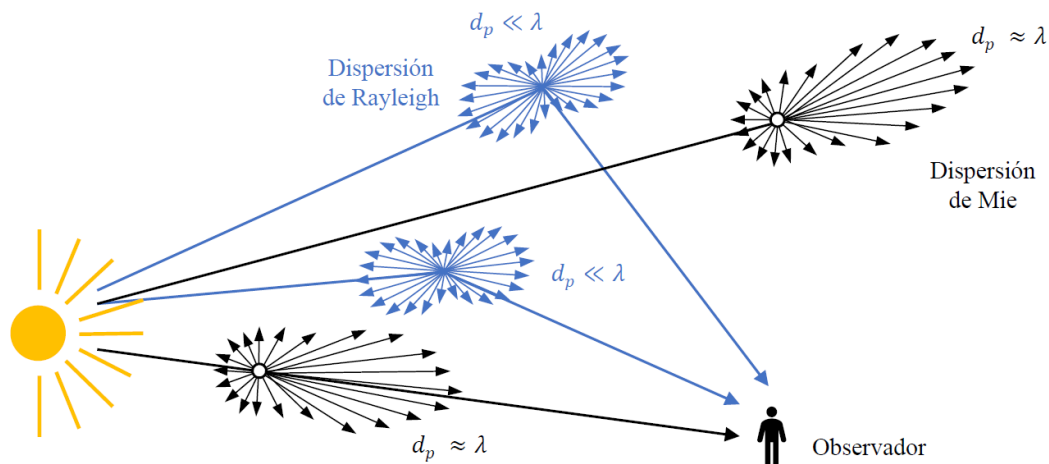


Figura 4. Esquema de la dispersión de Rayleigh y Mie.

La metodología de Mie considera ecuaciones de Maxwell de campos electromagnéticos que adopta una serie infinita de términos, por lo que es válido para cualquier tamaño de partículas siempre que estas sean esféricas. El método de Rayleigh es solo válido para partículas esféricas y de un tamaño mucho más pequeñas que la longitud de onda de la radiación que incide sobre ellas (Bohren & Huffman, 1983), esto ocurre en el caso del Black Carbon, pero deben tratarse como conjuntos de partículas independientes.

Si bien el método de Mie es válido para cualquier tamaño de partícula esférica, es muy costoso de ejecutar computacionalmente. La razón de utilizar la teoría de Rayleigh se basa en que corresponde a

una simplificación de la teoría de Mie, ya que descompone la serie infinita de términos y toma solo el primero de estos términos. No obstante, algunos autores proponen truncar la serie tomando más términos para conseguir resultados más exactos sin necesidad de emplear toda la serie.

La eficiencia de extinción definida por Rayleigh es la suma de la eficiencia de dispersión diferencial $Q_{sca_{vv}}$ y la eficiencia de absorción Q_{abs} mostradas en la Ecuación (13) y Ecuación (14), respectivamente.

$$Q_{sca_{vv}} = \alpha^4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (13)$$

$$Q_{abs} = -4\alpha \text{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \quad (14)$$

- Donde
- m: Valor del índice de refracción.
 - I: Intensidad de la radiación.
 - α : Término adimensional, representa la contribución de la longitud de onda y la distancia desde la partícula.

Bohren & Huffman (1983) proponen una modificación de la eficiencia de extinción extendiéndola a órdenes de α^4 , obteniendo así un nuevo término para la eficiencia de absorción Q_{abs} que se muestra en la Ecuación (15); se puede ver que, si el término en paréntesis se aproxima a 1, se obtiene la expresión propuesta por Rayleigh en la Ecuación (14).

$$Q_{abs} = 4\alpha \text{Im} \left\{ \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right\} \left[1 + \frac{4\alpha^3}{3} \text{Im} \left\{ \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right\} \right] \quad (15)$$

Por otro lado, Dobbins & Megaridis (Dobbins et al., 1994) proponen una modificación a la expresión propuesta por Bohren & Huffman, en donde desprecian el segundo y tercer término. Esto se expresa en la Ecuación (16).

$$Q_{abs} = 4\alpha \left[\text{Im} \left\{ \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right\} + \text{Im} \left\{ \left[\frac{\alpha^2}{15} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \frac{m^2 + 27m^2 + 38}{2m^2 + 3} \right] \right\} \right] \quad (16)$$

Cuando la forma de las partículas no es esférica, como es el caso de los aglomerados, no se puede emplear la teoría de Mie y es necesario aplicar algunas aproximaciones, una de ellas es la de Rayleigh-Debye-Gans que permite estudiar las propiedades ópticas de las partículas primarias que conforman el aglomerado de forma independiente y aplicar a cada una de ellas la teoría de Rayleigh, ya que estas partículas primarias tienen formas aproximadamente esféricas. Sin embargo, para tener en cuenta la dispersión múltiple de los aglomerados, se emplea un factor de corrección como el Mountain & Mulholland o el de Koylu & Faeth.

4 Metodología

En la Figura 5 se ilustra un esquema con la metodología propuesta. En el esquema se desglosan las actividades a realizar para cumplir con cada objetivo específico definido en el apartado 2.

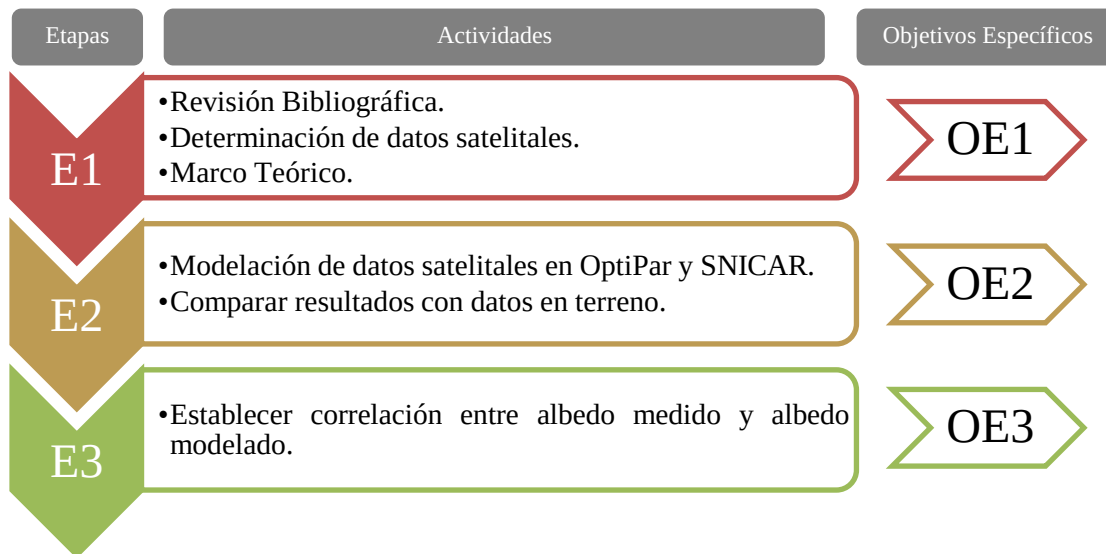


Figura 5. Metodología propuesta.

La Etapa 1 consiste, en primer lugar, en realizar una extensa revisión bibliográfica para lograr entender cada concepto relevante como son el albedo, black carbon, índice de refracción, factor de asimetría, etc. Para ello, es importante la lectura de papers y reportes de estudios similares como los realizados por Venegas & Flores, 2022; González-Correa & Lapuerta, 2021; Cereceda-Balic et.al, 2018; entre muchos otros que se citan en este informe. Luego de eso, se conoce y profundiza en los programas en los que se hacen las simulaciones, estos son OptiPar y SNICAR, para continuar con la obtención de los parámetros de entrada de modelación y la descarga de datos satelitales mediante la plataforma CAMS.

Una vez teniendo definidos los parámetros de entrada y procesados los datos del satélite, se puede continuar con la modelación en la Etapa 2. En esta etapa también se procesan los datos de albedo medidos en terreno para ambas cuencas y se realiza una comparación entre los resultados dados por los softwares y los medidos en terreno. Esta etapa es la más extensa de todo el trabajo.

Por último, la Etapa 3 consiste en encontrar una relación entre los albedos medidos en terreno y los modelados por el software OptiPar para representar de mejor manera la información real disponible. Esta etapa es la más breve del trabajo, sin ser menos importante.

5 Lugar de estudio

5.1 Subsubcuenca Río Juncal Antes Junta Estero Juncalillo y Junta Río Blanco

El primer lugar de estudio es la subsubcuenca Río Juncal Antes Junta Estero Juncalillo y Junta Río Blanco, la cual tiene un área de 264 [km²] y corresponde a una porción de la cuenca del Río Aconcagua. Esta cuenca se muestra en la Figura 6.

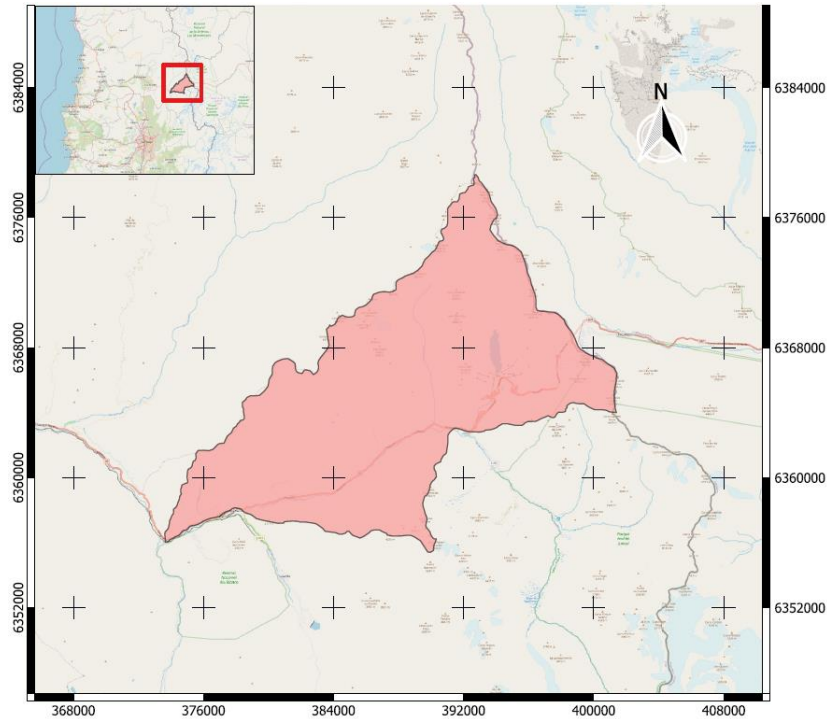


Figura 6. Subsubcuenca Río Juncal antes junta Estero Juncalillo y junta Río Blanco.

Las coordenadas geográficas (en grados) de esta cuenca se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la cuenca Río Juncal.

Cuenca Río Juncal	
Latitud	Entre -32.95° y -32.65°
Longitud	Entre -70.35° y -70.05°

5.2 Subsubcuenca Río Yeso

El segundo lugar de estudio corresponde a la subsubcuenca Río Yeso, la cual tiene un área de $627 \text{ [km}^2\text{]}$ y corresponde a una división de la cuenca del Río Maipo. Esta cuenca se muestra en la Figura 7.

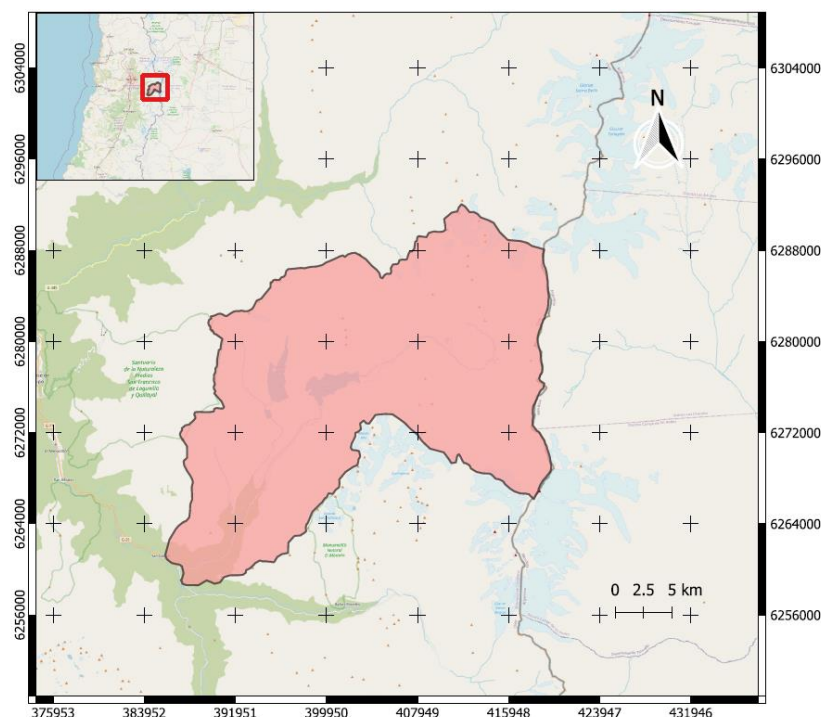


Figura 7. Subsubcuenca Río Yeso.

Las coordenadas geográficas (en grados) de esta cuenca se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Coordenadas geográficas Cuenca Río Yeso.

Cuenca Río Yeso	
Latitud	Entre -33.85° y -33.45°
Longitud	Entre -70.25° y -69.85°

6 Datos satelitales

Los datos satelitales se obtienen del sitio web de [CAMS](#) (Copernicus Atmosphere Monitoring Service), el cual corresponde a un inventario de datos que contiene distribuciones cuadriculadas de emisiones naturales y antropogénicas de contaminantes atmosféricos y gases de efectos invernadero a nivel global.

En la Tabla 3 se muestra la descripción de los datos generados por el satélite.

Tabla 3. Descripción de datos satelitales.

Tipo de datos	Cuadrículados
Cobertura horizontal	Global
Resolución horizontal	0.1° x 0.1° (Antropogénico)
Cobertura vertical	Superficie
Cobertura temporal	Años 2000 – 2023
Resolución temporal	Mensual
Formato de archivo	NetCDF
Frecuencia de actualización	Una o dos veces al año

Para efectos de este estudio, específicamente se utiliza la última versión de datos de flujo de Black Carbon que se depositan sobre la nieve, en unidades de $[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$, desde el año 2000 al año 2023; se selecciona la fuente Antropogénica, es decir, se considera la contribución de todos los sectores que producen Black Carbon, tales como industrias, transporte terrestre, embarcaciones, aviación,

residenciales, agricultura, etc. Finalmente, se filtra según las coordenadas geográficas de cada cuenca para obtener el comportamiento en el tiempo y espacio.

Con esta información, se generan series de tiempo del flujo de Black Carbon depositado en cada cuenca, estos se muestran en la Figura 8 y Figura 9, correspondiente a las cuencas Río Juncal y Río Yeso, respectivamente; cabe destacar que cada curva considera un pixel satelital de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ($0.1^\circ \sim 11$ [km]), es decir, cada curva representa una ubicación distinta en la cuenca.

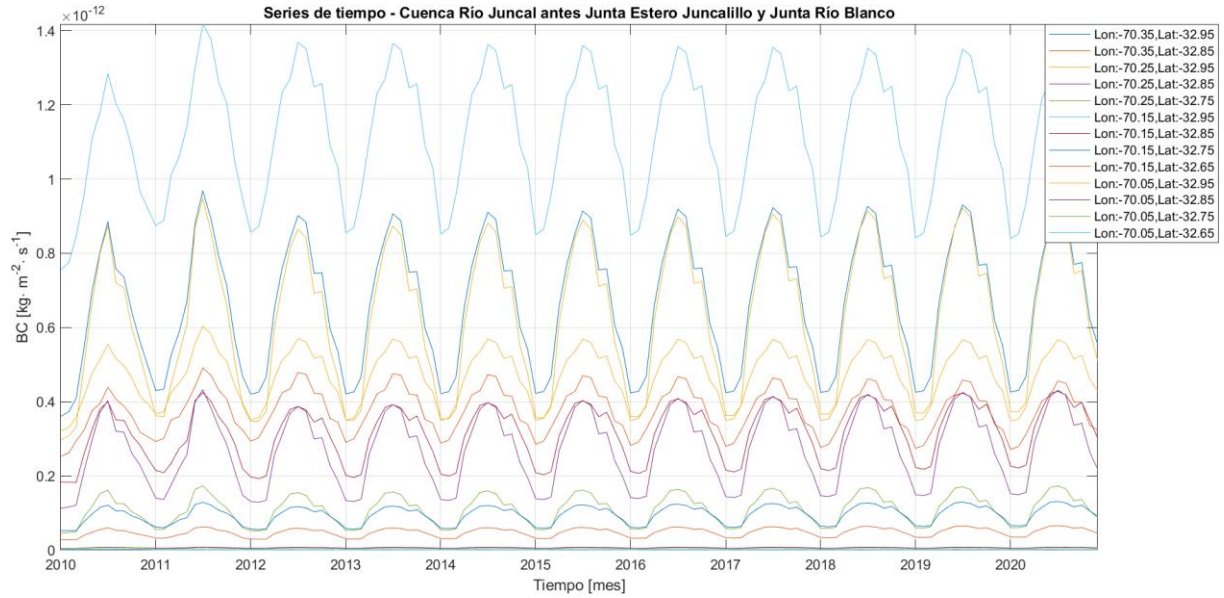


Figura 8. Serie de tiempo de datos satelitales de BC en la Cuenca Río Juncal.

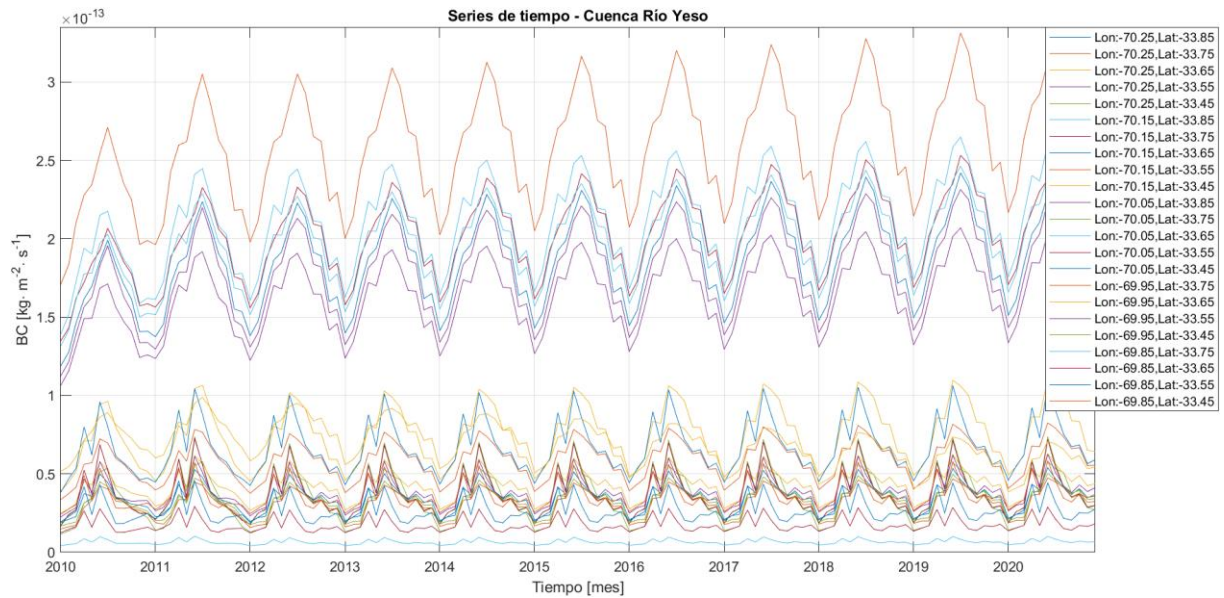


Figura 9. Serie de tiempo de datos satelitales de BC en la Cuenca Río Yeso.

De las curvas de series de tiempo, se puede observar que, en general, presentan un comportamiento temporal cíclico anual, es decir, para un mismo punto en el espacio los valores son muy similares de un año a otro y con el mismo orden de magnitud.

Además de esto, se puede notar que los valores máximos de BC se tienen en los meses de julio y los valores mínimos se dan en los meses de febrero; este comportamiento puede causarse por ciertos tipos de fuentes emisoras de Black Carbon, tales como residenciales, transporte y plantas generadoras de energía.

Por otro lado, también se puede observar la variación del flujo de Black Carbon según la ubicación en la cuenca, llegando incluso a tener diferencias de orden de magnitud. En general, se tiene que los valores más altos de BC se dan en los sectores Oeste de ambas cuencas, lo que se traduce en que mientras más cerca se esté de las ciudades, habrá mayor flujo de BC depositándose.

7 Datos de albedo medidos en terreno

Las mediciones de albedo en terreno para la cuenca Río Juncal se extraen de la plataforma Nunatak-1 del Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM), ubicado en la Escuela de Montaña del Ejército de Chile en el sector Portillo, sus coordenadas geográficas son: -32.84, -70.13. Mide variables atmosféricas como la radiación incidente y reflejada (onda corta y onda larga), la calidad del aire, meteorología y espesor de la nieve desde el año 2016. Para procesar los datos, solo se cuenta con información desde el año 2017 al 2019 y la resolución temporal es de minutos, entre los meses de junio y noviembre.

A continuación, se muestra la serie de tiempo de los años 2017, 2018 y 2019 en la Figura 10, Figura 11 y Figura 12, respectivamente. En las imágenes se puede observar que hay algunos datos no medidos (en blanco).

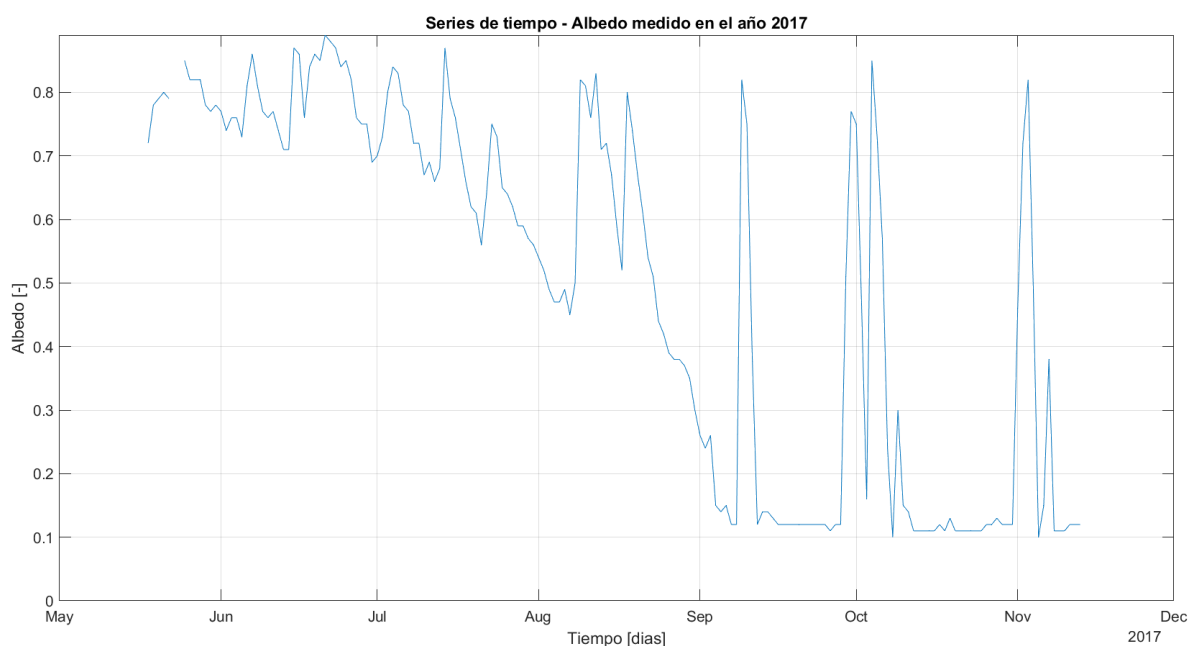


Figura 10. Serie de tiempo de albedo medido en terreno, Cuenca Río Juncal, año 2017.

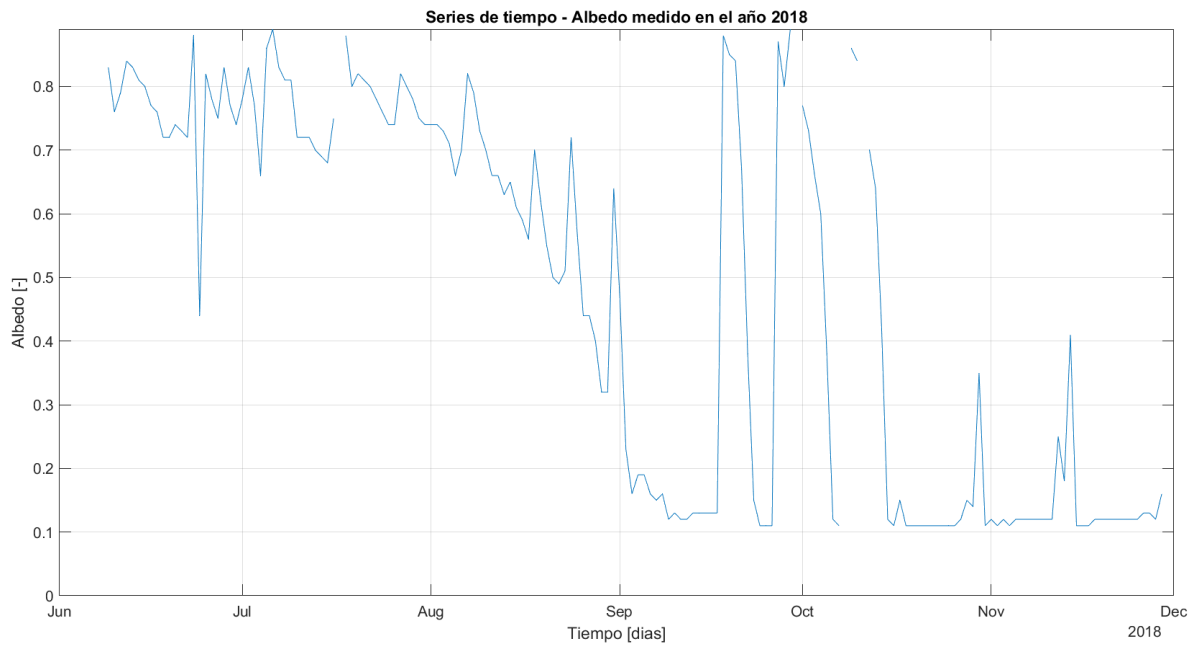


Figura 11. Serie de tiempo de albedo medido en terreno, Cuenca Río Juncal, año 2018.

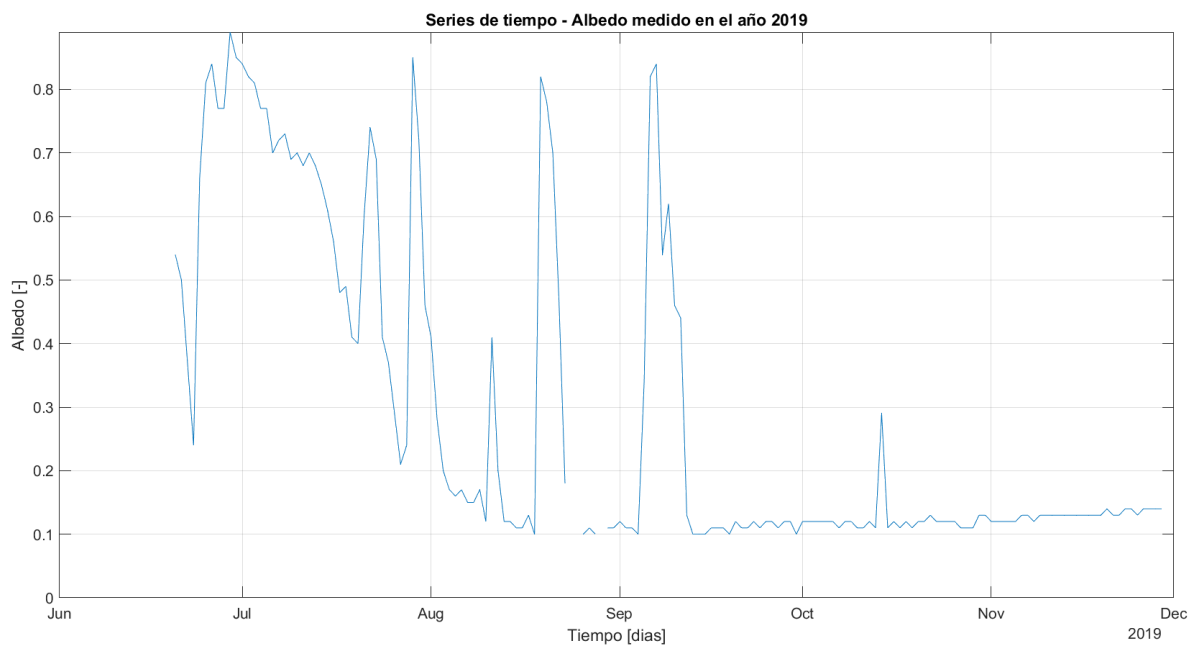


Figura 12. Serie de tiempo de albedo medido en terreno, Cuenca Río Juncal, año 2019.

Con los datos anteriores, se calcula el albedo promedio para cada mes, ignorando los datos en blanco. Los resultados mensuales del albedo medido se observan en la Figura 13.



Figura 13. Serie de tiempo de albedo medido, Cuenca Río Juncal, promedio mensual.

De la Figura 13 se desprende que los mayores valores de albedo ocurren en los meses de invierno, y disminuyen llegando al verano; esto puede deberse a que en el invierno se encuentra una mayor cantidad de precipitación sólida joven y que lleva poco tiempo expuesta a los contaminantes atmosféricos, por lo tanto, en invierno es más probable encontrar nieve limpia con un mayor valor de albedo. Además, valores muy pequeños (~ 0.3 o menores) pueden corresponder al albedo del suelo natural, es decir, lugares donde no se encuentre nevado en el momento de la medición.

Del mismo modo, las mediciones de albedo en terreno para la cuenca Río Yeso se extraen de la plataforma Nunatak-2 de CETAM, ubicado hacia aguas abajo del Embalse El Yeso, sus coordenadas geográficas son: -33.67, -70.09. Se cuenta con datos desde el año 2021 al 2023 y la resolución temporal es de minutos.

A continuación, se muestra la serie de tiempo de los años 2021, 2022 y 2023 en la Figura 14, Figura 15 y Figura 16, respectivamente. En las imágenes se puede observar que hay algunos datos no medidos (en blanco).

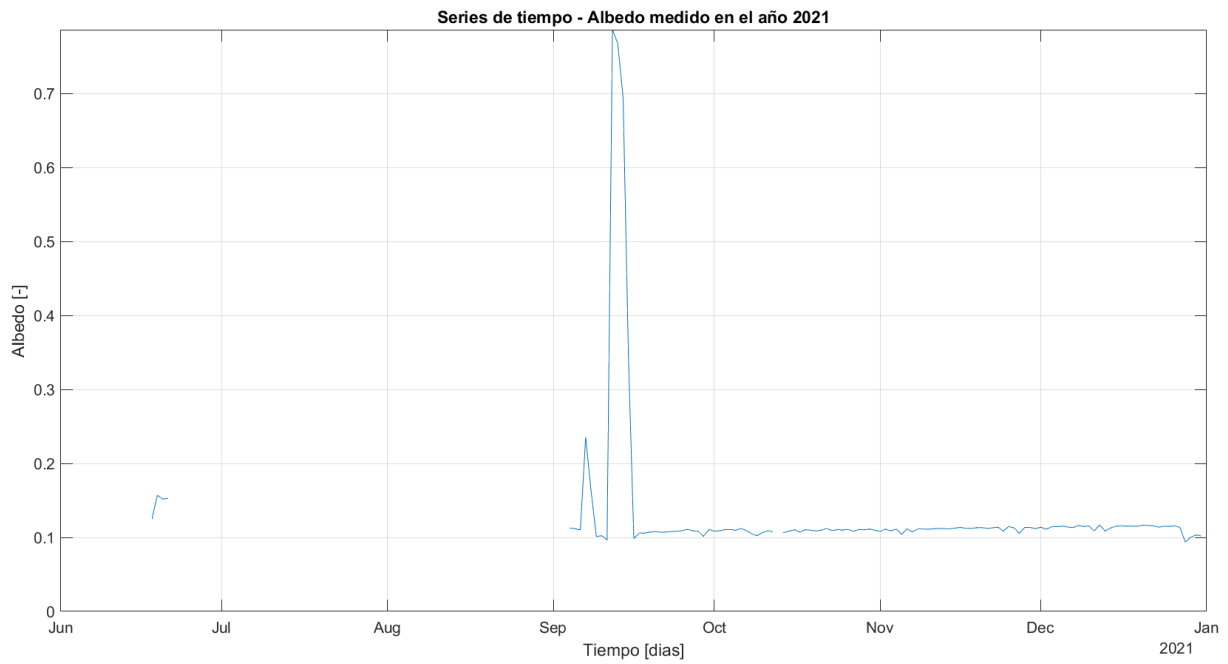


Figura 14. Serie de tiempo de albedo medido en terreno, Cuenca Río Yeso, año 2021.

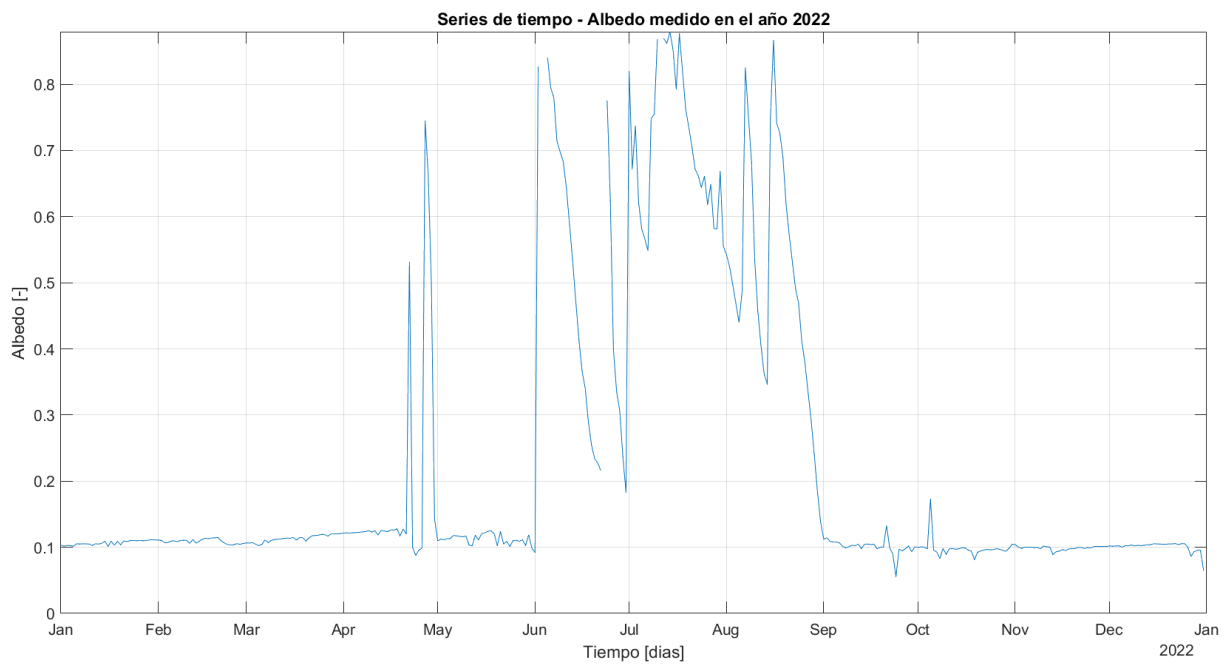


Figura 15. Serie de tiempo de albedo medido en terreno, Cuenca Río Yeso, año 2022.

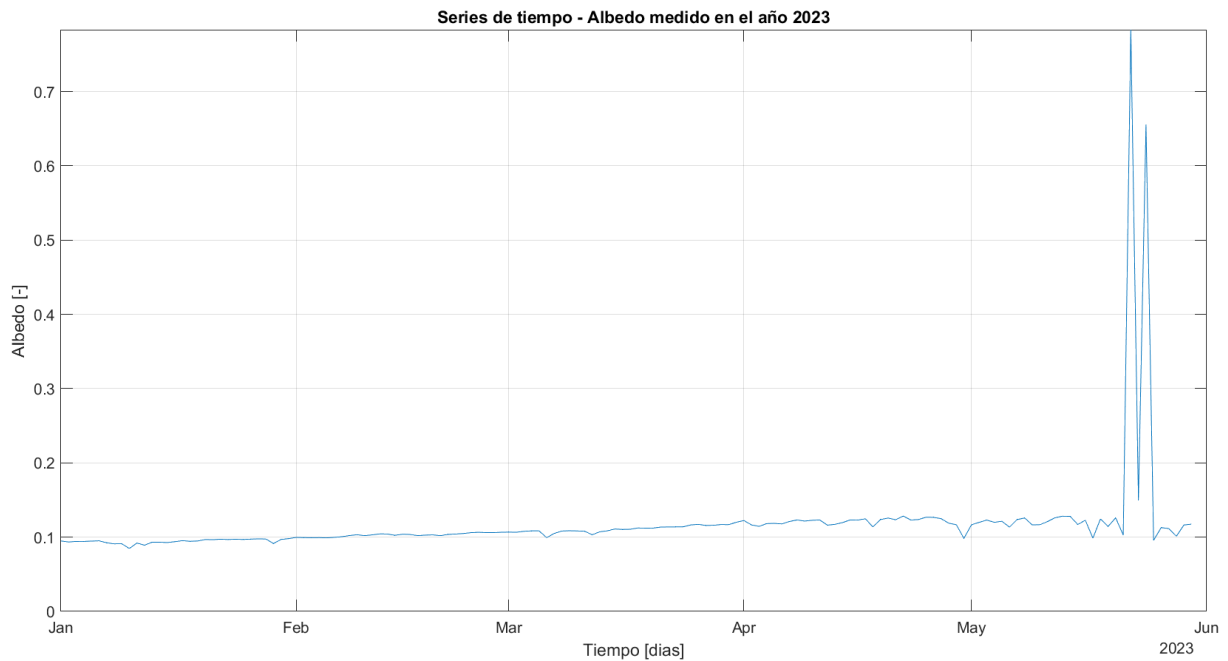


Figura 16. Serie de tiempo de albedo medido en terreno, Cuenca Río Yeso, año 2023.

Con los datos anteriores, se calcula el albedo promedio para cada mes, ignorando los datos en blanco. Los resultados mensuales del albedo medido se observan en la Figura 17.

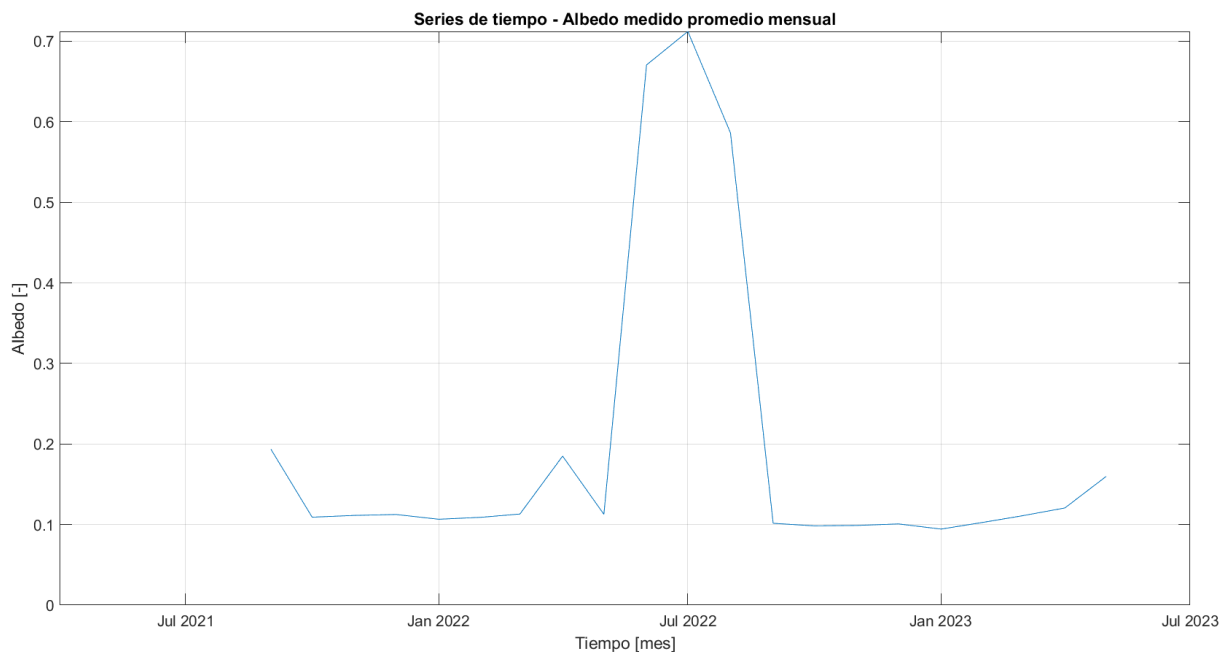


Figura 17. Serie de tiempo de albedo medido, Cuenca Río Yeso, promedio mensual.

En la Figura anterior se observa que una gran cantidad de datos tienen un albedo de 0.1 aproximadamente, lo cual no corresponde a un valor de nieve natural y se podría tratar de la medición de albedo de suelo. Sin embargo, en julio de 2022 se evidencia un peak de 0.7 de albedo, lo cual se ajusta a un valor esperado de nieve.

8 Tiempo de estudio

El tiempo de estudio para la cuenca Río Juncal corresponde a los meses de junio a agosto para los años 2017, 2018 y 2019. Por otra parte, para la segunda cuenca Río Yeso, el tiempo de estudio corresponde a los meses de junio a agosto para el año 2022. Esto debido a que, como se mencionó en el capítulo anterior, son los períodos de tiempo que cuentan con mediciones razonables en terreno y permite hacer comparaciones para cumplir con el objetivo.

El análisis se realiza a nivel mensual y también diario. Para el primer caso, se consideran todos los puntos espaciales de las cuencas con el fin de reproducir la resolución temporal y espacial del satélite CAMS. Por otro lado, para el estudio a nivel diario se considera constante el valor de Black Carbon satelital para todos los días del mes correspondiente y en un solo punto en el espacio (el más cercano de las zonas de medición de albedo), con el objeto de simular la resolución de los radiómetros dispuestos en terreno.

9 Modelación: Definición de parámetros

Fuente de luz

Para efectos de este estudio y considerando que se quiere modelar la nieve en estado natural, se opta por seleccionar la fuente de luz Espectro Solar, la cual se representa en la Figura 18.

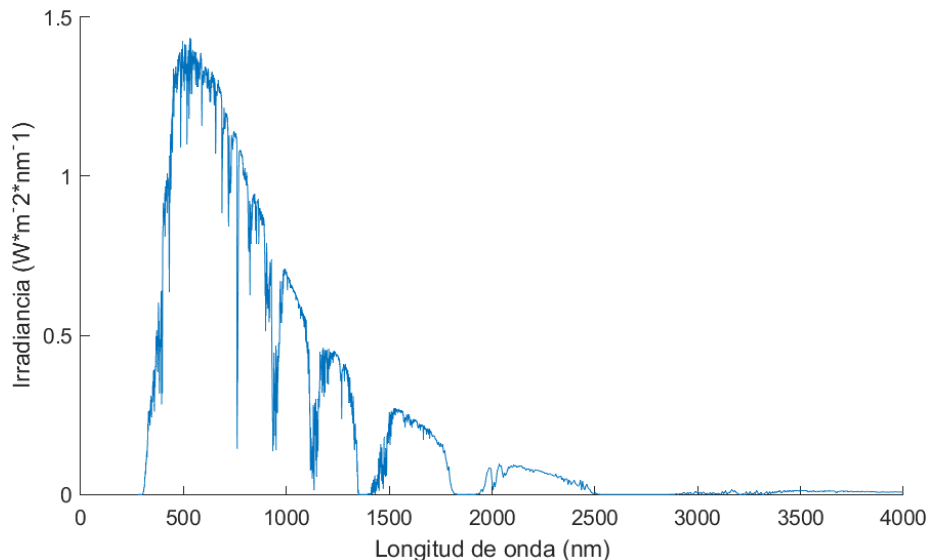


Figura 18. Representación de la fuente de luz Espectro Solar en OptiPar.

Índice de refracción

Para el índice de refracción del Black Carbon, se cuenta con los métodos de Chang & Charalampopoulos (1990), Liu & Bescond (2015) y el modelo de dispersión (Stull & Plass, 1960), este último presenta problemas en cuanto a mantos contaminados, por lo cual se descarta para esta modelación. Luego, entre los dos métodos restantes, se opta por el método de Chang & Charalampopoulos basándose en el estudio realizado por Venegas & Flores (2022), en el que se señala que con el método de Liu & Bescond se obtiene una mayor desviación estándar con respecto a los valores reales medidos de albedo.

En la Figura 19 se representa el índice de refracción de Chang & Charalampopoulos en función de la longitud de onda.

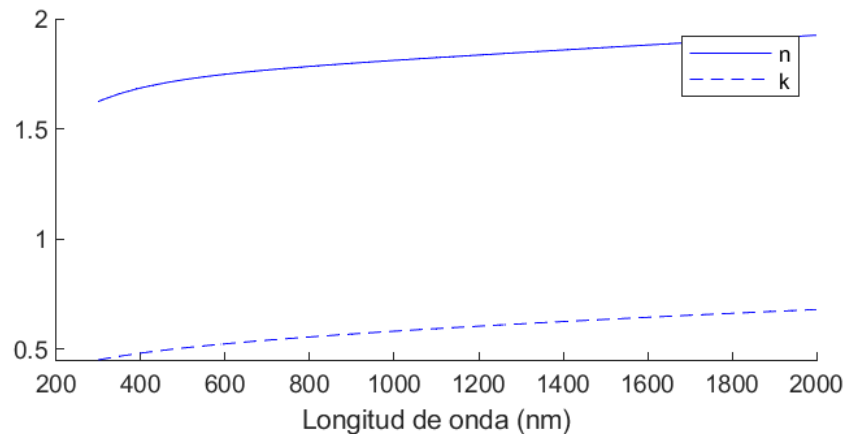


Figura 19. Representación del índice de refracción de Chang & Charalampopoulos en OptiPar.

Por otra parte, para el índice de refracción de la nieve se utiliza el propuesto por Warren & Brandt (Warren & Brandt, 2008) ya que se asume el material en estado de hielo.

Factor de asimetría

Para el factor de asimetría, OptiPar presenta los factores propuestos por Debye (Bohren & Huffman, 1983), Macke (Macke et al., 1996) y Yang (Yang & Fu, 2009). En este caso, se analiza el comportamiento de los tres factores de asimetría propuestos por el software, para optar por el que entregue menor error al comparar con los datos en terreno de la cuenca Río Juncal.

Tamaño del grano de nieve

El tamaño de un grano o partícula corresponde al valor de su máxima extensión, este puede ser muy variable y depende del tiempo en que la nieve lleve depositada. Los granos de nieve crecen naturalmente a medida que envejecen, y los granos más grandes permiten que la luz del sol penetre más profundamente en la capa, lo que reduce el albedo de la superficie (Hadley & Kirchstetter, 2012).

Según el Manual de Nieve y Nivometría (MOP & DGA, 2008), el tamaño de los granos de hielo puede clasificarse según la Tabla 4, en donde el tamaño medio de los granos es cercano o superior a 0,5 [mm], incluso 1 [mm].

Tabla 4. Descripción del tamaño de los granos de hielo.
Fuente: Manual de Nieve y Nivometría (MOP & DGA, 2008).

Descripción	Tamaño
Muy fino	Inferior a 0,2 [mm]
Fino	Entre 0,2 y 0,5 [mm]
Medio	Entre 0,5 y 1,0 [mm]
Grueso	Entre 1,0 y 2,0 [mm]
Muy grueso	Entre 2,0 y 5,0 [mm]
Extremo	Superior a 5,0 [mm]

Además, en el estudio realizado por Cereceda-Balic (2018) se tomaron fotografías de la nieve en el sector del Portillo, Chile, indicando que el tamaño promedio del grano es aproximadamente de 0,5 [mm].

De todas formas, este parámetro será objeto de análisis ya que, según Figueroa-Villanueva (2023), es una de las variables más relevantes en la modelación de albedo de nieve.

Dimensión fractal

Se analiza el comportamiento en la región visible y en la región infrarroja cercana de un aglomerado con la morfología más común. La dimensión fractal puede tomar valores comprendidos entre 1 y 3, por lo que se selecciona un valor intermedio de 1,85 para el Black Carbon (González-Correa et al., 2022), evitando escoger el valor de dimensión fractal 2 porque genera singularidades en algunos métodos de cálculo (Rubio & Lapuerta, 2018).

Número de partículas primarias

Normalmente, los aglomerados de Black Carbon están conformados como máximo por 300 partículas primarias, siendo habituales valores alrededor de 80 partículas primarias (González-Correa et al., 2022), por ende, se decide adoptar este valor en la modelación.

Densidad superficial de la nieve

La densidad de la nieve, al igual que el tamaño del grano, es variable y depende del tiempo que la nieve lleve depositada. En general, los estratos más antiguos son más densos que los superficiales.

Según Cereceda-Balic (2018) en su estudio realizado en el Portillo, la densidad de la capa superior de nieve es de 279 [kg/m³], esta medición fue llevada a cabo a través de la medición de un pozo de prueba excavado.

Teniendo en cuenta lo anterior, se decide adoptar el valor de la densidad superficial de la nieve de 279 [kg/m³].

Sin embargo, para que la Ecuación (4) sea consistente es necesario que el parámetro ρ_s (correspondiente a la densidad superficial de la nieve) sea 581 [kg/m³], con esto, resulta que a una profundidad de 0,1 [cm] la densidad de la nieve es aproximadamente 279 [kg/m³], que es lo deseable.

En la Figura 20 se observa la variación de la densidad de nieve según la profundidad del manto.

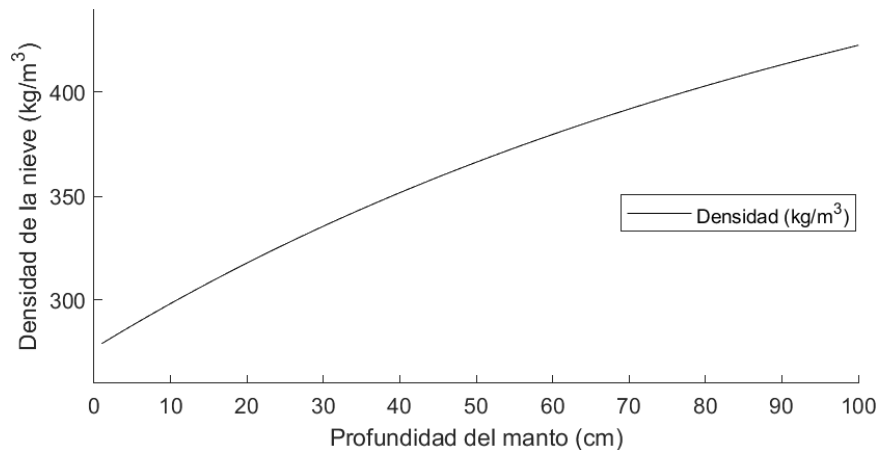


Figura 20. Densidad de la nieve en profundidad.

Ángulo cenital

El ángulo cenital depende de la longitud y la latitud de la zona en estudio, de la cantidad de días desde que ha iniciado el año, de la hora local y su diferencia con el horario universal UTC, entre otros factores ya definidos.

A continuación, se estudia el comportamiento del ángulo cenital en función de la hora del día, desde las 8 a las 17 horas, y también según las cuatro estaciones del año. Los parámetros para el cálculo se encuentran en la Tabla 5 y los resultados se muestran en la Figura 21.

Tabla 5. Parámetros para el cálculo del ángulo cenital según hora y estación del año.

Longitud	-70.15°
Latitud	-32.87°
Fecha de Otoño	20-03-2020
Fecha de Invierno	21-06-2020
Fecha de Primavera	23-09-2020
Fecha de Verano	21-12-2020

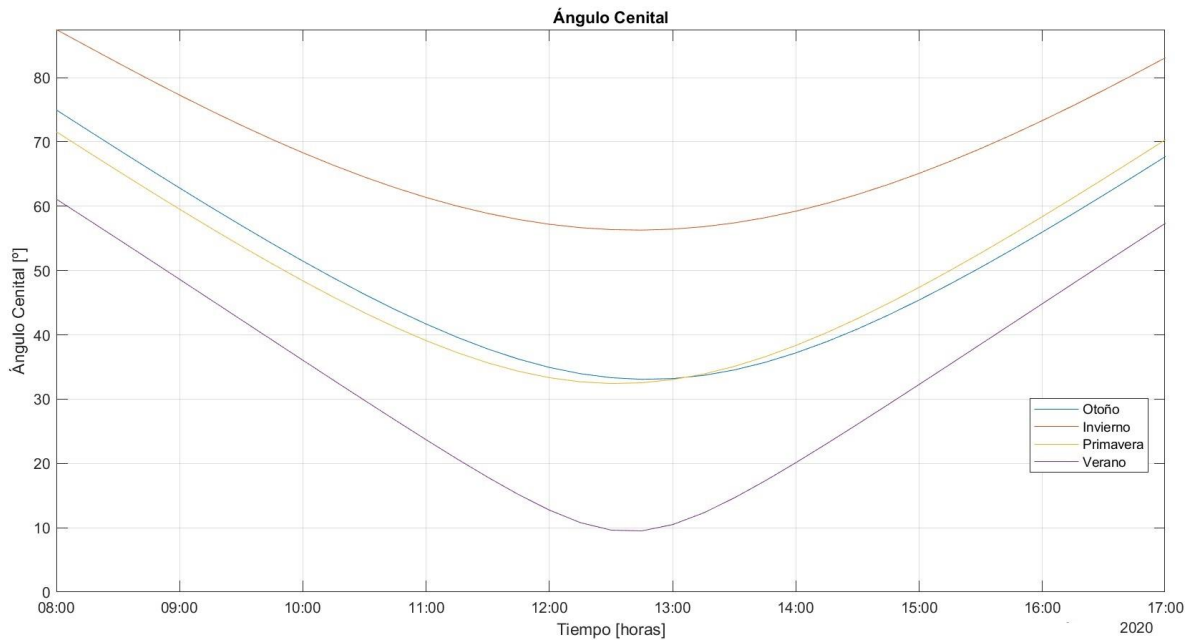


Figura 21. Ángulo Cenital según hora y estación del año.

En la Figura 21 se observa que los menores valores del ángulo cenital se tienen entre las 12 y 13 horas, y los mayores valores son a las 8 y 17 horas. Esto tiene sentido con la definición del ángulo cenital, en la que un valor de 0° quiere decir que el sol está situado sobre la vertical del punto de referencia, mientras que un valor de 90° representa que el sol se encuentra en la horizontal del punto de referencia.

Por otra parte, en este estudio la longitud y la latitud son variables y dependen de la cuenca a analizar. En la Figura 22 se observa la variación del ángulo cenital en la Cuenca Río Juncal antes Junta Estero Juncalillo y Junta Río Blanco. Asimismo, en la Figura 23 se puede ver la variación del ángulo cenital en la Cuenca Río Yeso. En ambas figuras, el cálculo se realiza para el mediodía (12 horas) y considerando un período de tiempo de un año, de acuerdo con el procedimiento descrito en el apartado 3.4 (sección Ángulo Cenital), además, cada curva representa una ubicación distinta en las cuencas.

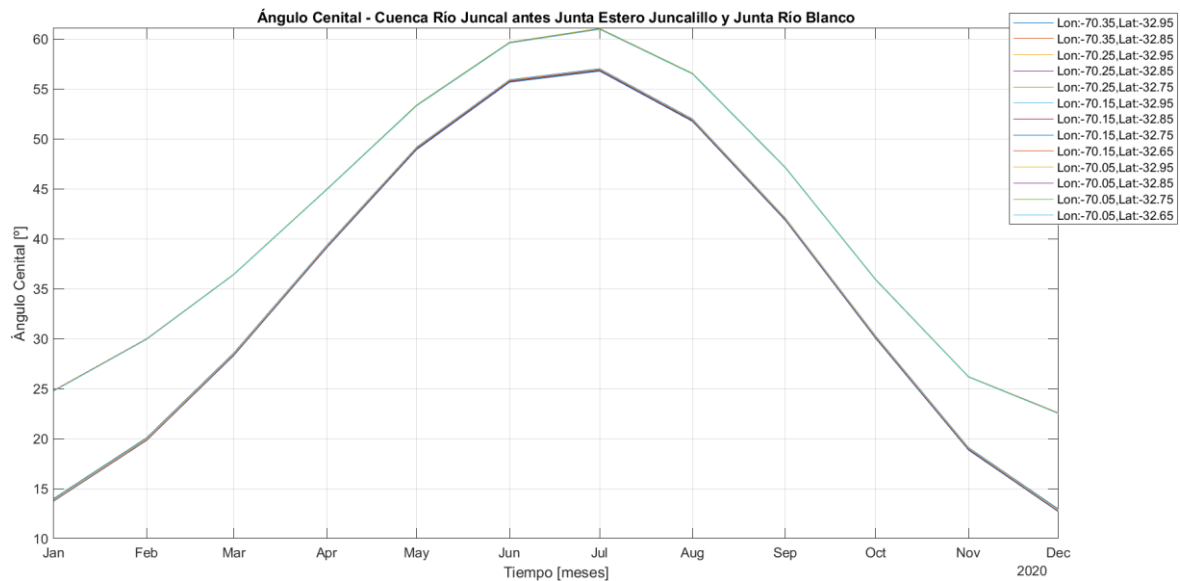


Figura 22. Ángulo Cenital, Cuenca Río Juncal.

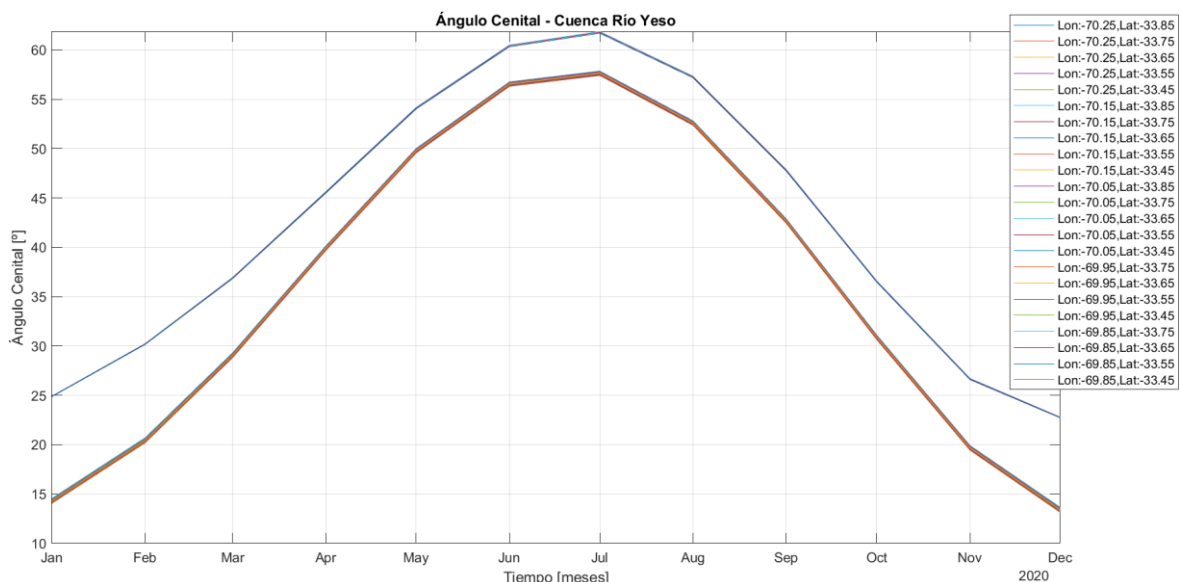


Figura 23. Ángulo Cenital, Cuenca Río Yeso.

De las Figuras anteriores se observa que los mayores valores de ángulo cenital se dan en los meses de invierno y los menores en verano, nuevamente, esto tiene sentido con la definición del ángulo cenital, que se mide entre la vertical imaginaria sobre el punto de referencia y la posición del sol.

Espesor del manto y Método de cálculo

Respecto a la profundidad del manto y el método de cálculo para modelar, como antecedente se tiene el estudio realizado por Venegas & Flores (2022), en el cual se señala que “Para minimizar al máximo el error, se recomienda el uso de OptiPar con el método de cálculo “Bohren-Hoffmann & Mountain-Mulholland” con una profundidad de manto de 5 cm”.

En este caso, se analiza los tres métodos de cálculo propuestos por el software (Rayleigh, Bohren-Hoffmann y Dobbins & Megaridis) y también diferentes espesores de manto nival, con el fin de realizar la modelación con el método y espesor que entreguen menor error al comparar con los datos en terreno de la cuenca Río Juncal.

10 Resultados y Discusión

En primer lugar, se analizan ciertos parámetros de modelación en OptiPar tales como Factor de Asimetría, Tamaño de grano, Método de Cálculo y Espesor del manto nival.

10.1 Factor de Asimetría

Como se mencionó previamente, los tres factores de asimetría propuestos por OptiPar son: Yang, Debye y Macke, y se comparan con los datos en terreno de la cuenca Río Juncal antes Junta Estero Juncalillo y Junta Río Blanco a nivel mensual. Los resultados se muestran en la Figura 24.

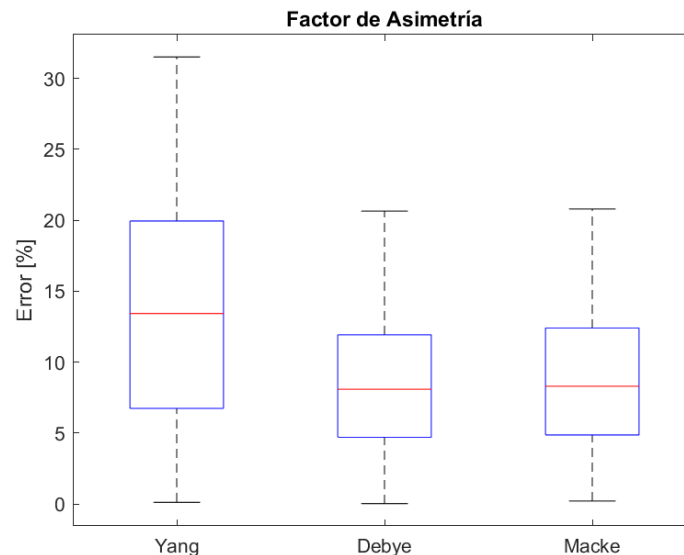


Figura 24. Errores en los factores de asimetría.

Se observa que, para el factor de asimetría de Yang, el 75% de los datos presenta un error menor a 19,94%; para Debye, el 75% de los datos presenta un error menor a 11,92%; mientras que para Macke, el 75% de los datos presenta un error menor a 12,39%. En la Tabla 6 se muestran los valores de representación de dispersión de datos y error.

Tabla 6. Análisis del Factor de Asimetría.

Parámetro	Factor de Asimetría		
	Yang	Debye	Macke
Valores superiores a datos en terreno [%]	5,13	50,43	53,85
Valores inferiores a datos en terreno [%]	94,87	49,57	46,15
Error promedio [%]	13,57	8,50	8,57
Desviación estándar [%]	8,18	5,22	5,25
Mediana [%]	13,43	8,09	8,30
Percentil 75 [%]	19,94	11,92	12,39

De la Tabla 6 se desprende que el factor de asimetría de Yang es el que entrega resultados más desfavorables pues es el que tiene mayor desviación estándar, mayor error promedio y su mediana y percentil 75 son los más altos de la Tabla.

Por otro lado, los resultados entre Debye y Macke son muy similares, sin embargo, el factor de asimetría propuesto por Debye toma una leve ventaja en todos los indicadores de dispersión, esto es, presenta una mejor distribución en cuanto a valores superiores e inferiores en comparación a los datos medidos en terreno, y también presenta menor error promedio, menor desviación estándar, y la mediana y percentil 75 son los más bajos de la Tabla. Por estas razones, se decide optar por la modelación con el factor de asimetría propuesto por Debye.

10.2 Tamaño de Grano

De la misma forma, se comparan diferentes tamaños de grano de la nieve, estos son: 0,2, 0,5 y 0,8 [mm]. Los resultados se muestran en la Figura 25.

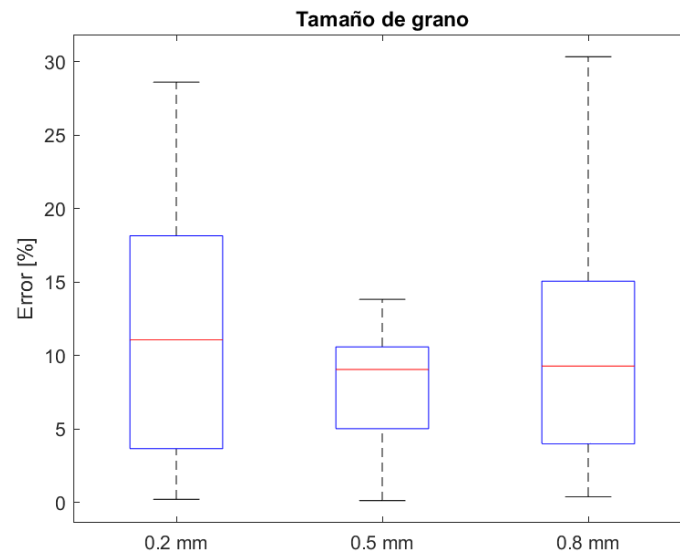


Figura 25. Errores porcentuales en el Tamaño de grano.

En la Figura 26 se observa que, para la modelación con el tamaño de grano igual a 0,2 [mm], el 75% de los datos presenta un error menor a 18,14%; con tamaño de grano igual a 0,5 [mm], el 75% de los datos presenta un error menor a 10,58%; mientras que para el tamaño de grano de 0,8 [mm], el 75% de los datos presenta un error menor a 15,05%. En la Tabla 8 se muestran los parámetros de dispersión de datos para los tres tamaños de grano.

Tabla 7. Análisis del Tamaño de grano.

Parámetro	Tamaño de grano		
	0,2 [mm]	0,5 [mm]	0,8 [mm]
Valores superiores a datos en terreno [%]	75,21	44,44	31,62
Valores inferiores a datos en terreno [%]	24,79	55,56	68,38
Error promedio [%]	11,44	7,52	10,09
Desviación estándar [%]	8,02	4,65	7,09
Mediana [%]	11,06	9,04	9,28
Percentil 75 [%]	18,14	10,58	15,05

De la Tabla 7 se observa que, de los tres tamaños de grano analizados, el valor de 0,5 [mm] es el que tiene una distribución de datos más homogénea pues presenta un 44,4% de datos por sobre los datos reales y un 55,6% de datos que están por debajo, además tiene una notoria ventaja en todos los indicadores de dispersión señalados. Esto concuerda con lo mencionado en el apartado 9, al ser un tamaño de grano medio y tiene coherencia con los valores de tamaño de nieve encontrados por Cereceda-Balic (2018).

Ante esto, se adopta el tamaño de 0,5 [mm] como el más adecuado para la modelación, equivalente a $5 \cdot 10^5$ [nm].

10.3 Método de Cálculo

Asimismo, se comparan los métodos de cálculo de Rayleigh, Bohren & Huffman y Dobbins & Megaridis. Los resultados son los siguientes:

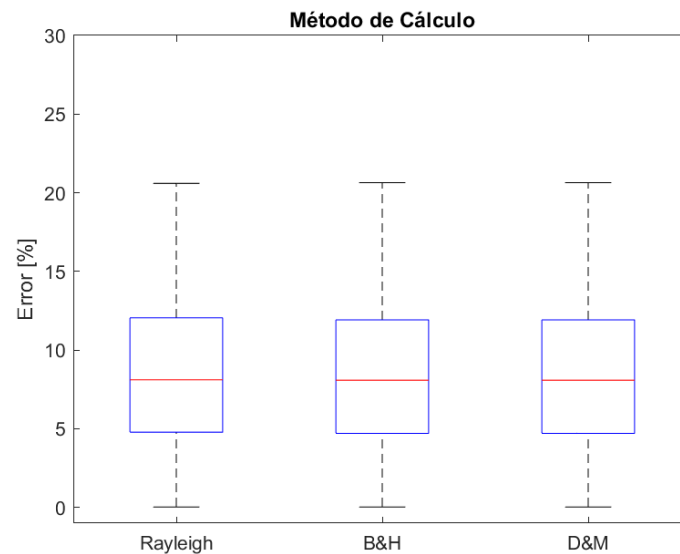


Figura 26. Errores porcentuales en el Método de cálculo.

En la Figura 26 se observa que, para el cálculo a través del método de Rayleigh, el 75% de los datos presenta un error menor a 12,05%; para Bohren & Huffman, el 75% de los datos presenta un error menor a 11,92%; mientras que para Dobbins & Megaridis, el 75% de los datos presenta un error menor a 11,92%. En la Tabla 8 se muestran los parámetros de dispersión de datos para los tres métodos.

Tabla 8. Análisis del Método de Cálculo.

Parámetro	Método de Cálculo		
	Rayleigh	B&H	D&M
Valores superiores a datos en terreno [%]	49,57	50,43	50,43
Valores inferiores a datos en terreno [%]	50,43	49,57	49,57
Error promedio [%]	9,10	8,50	8,50
Desviación estándar [%]	7,99	5,22	5,22
Mediana [%]	8,11	8,09	8,09
Percentil 75 [%]	12,05	11,92	11,92

Se observa que los tres métodos de cálculo expuestos dan resultados muy similares con porcentajes de errores casi idénticos, solo se nota una leve desventaja en todos los parámetros del método de Rayleigh, prácticamente despreciable. Ante esto y basado en los resultados obtenidos del estudio de Venegas & Flores (2022), se decide optar como mejor método de modelación al propuesto por Bohren & Huffman con la corrección de Mountain-Mulholland pues este método corresponde a una abreviación de la serie de Taylor, según lo explicado en el apartado 3.4.

10.4 Espesor del Manto Nival

Por último, se analiza el espesor del manto nival entre 5, 10, 15, 30 y 50 [cm] a escala temporal mensual. Los resultados son los siguientes:

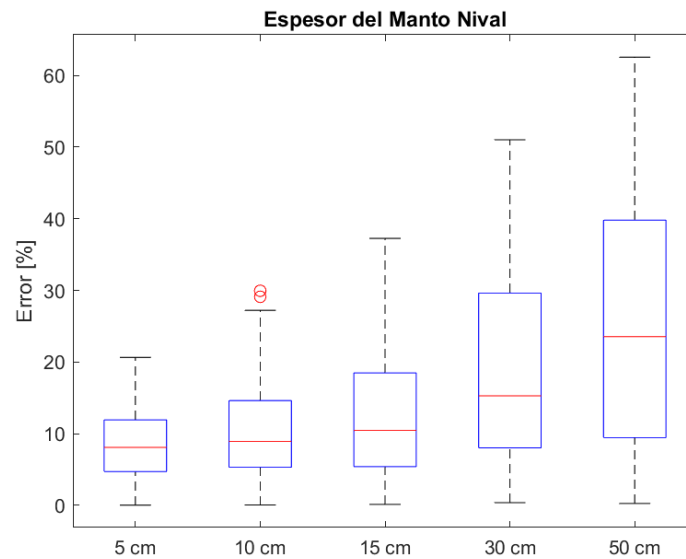


Figura 27. Errores porcentuales en el espesor del manto nival.

En la Figura 27 se observa que, para el espesor de manto nival de 5 cm, el 75% de los datos presenta un error menor a 11,92%; para 10 cm, el 75% de los datos presenta un error menor a 14,62%; mientras que para 15 cm, el 75% de los datos presenta un error menor a 18,48%. Asimismo, otras profundidades de manto como 30 cm, presenta un error del 29,63% para el 75% de los datos; y con 50 cm, un 39,81% de error en el 75% de los datos. En la Tabla 9 se muestra el comportamiento para los cinco valores de espesor.

Tabla 9. Análisis del espesor de manto nival.

Parámetro	Espesor del Manto Nival				
	5 [cm]	10 [cm]	15 [cm]	30 [cm]	50 [cm]
Valores superiores a datos en terreno [%]	50,43	42,74	30,77	25,64	20,51
Valores inferiores a datos en terreno [%]	49,57	57,26	69,23	74,36	79,49
Error promedio [%]	8,50	10,19	12,62	19,39	25,93
Desviación estándar [%]	5,22	6,83	8,74	13,48	17,79
Mediana [%]	8,09	8,94	10,44	15,28	23,54
Percentil 75 [%]	11,92	14,62	18,48	29,63	39,81

Al examinar la Tabla 9, se observa que todos los parámetros de dispersión señalan que el error aumenta a medida que se incrementa el espesor del manto nival. Basándose en lo que resaltan los indicadores, es decir error promedio, desviación estándar, mediana, percentil 75 y valores superiores e inferiores a los datos en comparación, se tiene que el mejor espesor de manto nival para esta modelación es de 5 [cm].

10.5 Comparación entre OptiPar y SNICAR

A continuación, se realiza la simulación en OptiPar para la cuenca Río Juncal con el factor de asimetría, tamaño de grano, método de cálculo y espesor de manto obtenidos recientemente. De la misma forma, se modela a través de SNICAR para proceder a comparar resultados entre ambos. La modelación se realiza a escala de tiempo mensual y también diaria.

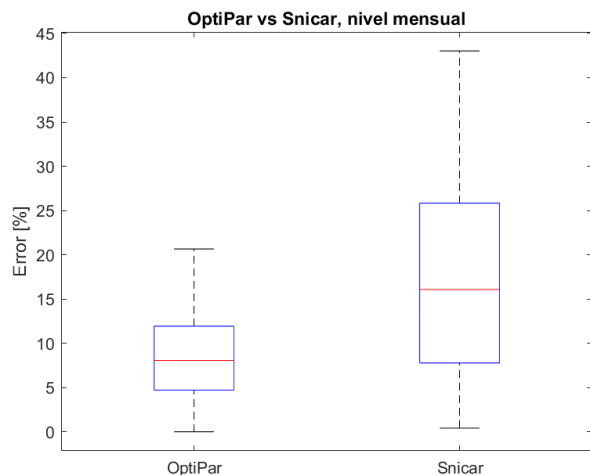


Figura 28. Errores porcentuales entre softwares, cuenca Río Juncal, nivel mensual.

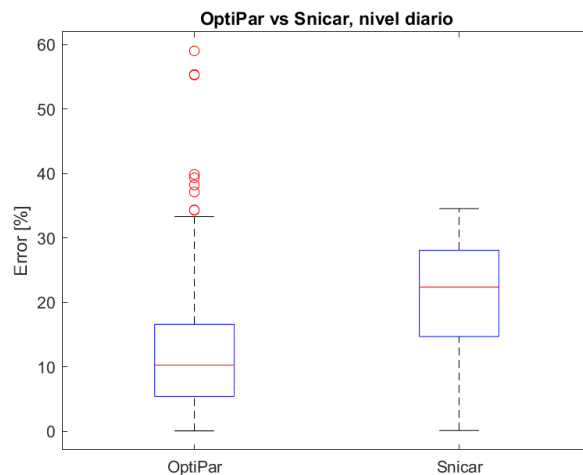


Figura 29. Errores porcentuales entre softwares, cuenca Río Juncal, nivel diario.

En la Figura 28 se observa que al comparar los valores modelados con los datos medidos en terreno en la cuenca Río Juncal antes Junta Estero Juncalillo y Junta Río Blanco a través del programa OptiPar, se presenta un error menor a 11,9% para el 75% de los datos; mientras que el software Snicar muestra un error menor a 25,8% para el 75% de los datos. De la misma forma, en la Figura 29, OptiPar señala un error de 16,6% para el 75% de los datos, y Snicar un error menor a 28,1% para el 75% de los datos. Los indicadores de dispersión se ilustran en la Tabla 10.

Tabla 10. Análisis de comparación entre softwares, cuenca Río Juncal.

Parámetro	Escala de tiempo mensual		Escala de tiempo diaria	
	OptiPar	SNICAR	OptiPar	SNICAR
Valores superiores a datos en terreno [%]	50,43	21,37	31,28	10,26
Valores inferiores a datos en terreno [%]	49,57	78,63	68,72	89,74
Error promedio [%]	8,49	17,46	12,32	20,71
Desviación estándar [%]	5,22	10,90	10,00	11,76
Mediana [%]	8,07	16,08	10,28	22,39
Percentil 75 [%]	11,93	25,83	16,61	28,11

De la Tabla 10, se puede ver claramente una ventaja del programa OptiPar sobre SNICAR, pues el segundo presenta un 79% de datos inferiores a los datos en terreno en el caso del análisis mensual y un 90% de datos inferiores con el estudio a nivel diario, lo cual indica que esta modelación tiende a subestimar los valores reales, además, la diferencia promedio de estos datos en general es mayor que la entregada por OptiPar.

Toda esta información también se complementa con las Figura 28 y Figura 29 pues evidencian esta ventaja. Además, a continuación, se ilustran gráficas (Figura 30 y Figura 31) que muestra los albedos modelados por ambos softwares y el albedo medido en la cuenca ya mencionada, con el fin de visualizar claramente el comportamiento entre ellos.

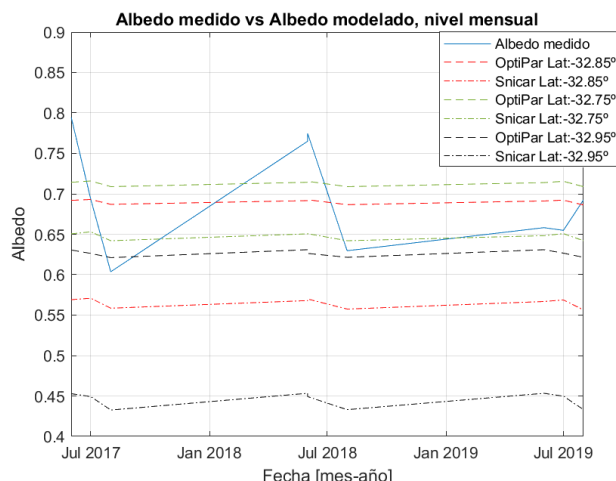


Figura 30. Comparación Albedo medido y modelado, Cuenca Río Juncal, nivel mensual.

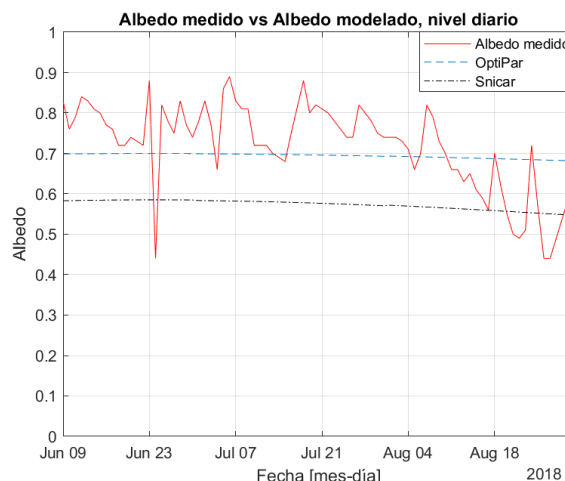


Figura 31. Comparación Albedo medido y modelado, Cuenca Río Juncal, nivel diario.

En la misma línea, se realiza la modelación en los dos softwares estudiados, esta vez para la cuenca del Río Yeso. En las Figuras 32 y 33 se muestra la comparación entre los valores modelados y los medidos en terreno en el embalse El Yeso a escala temporal mensual y diaria.

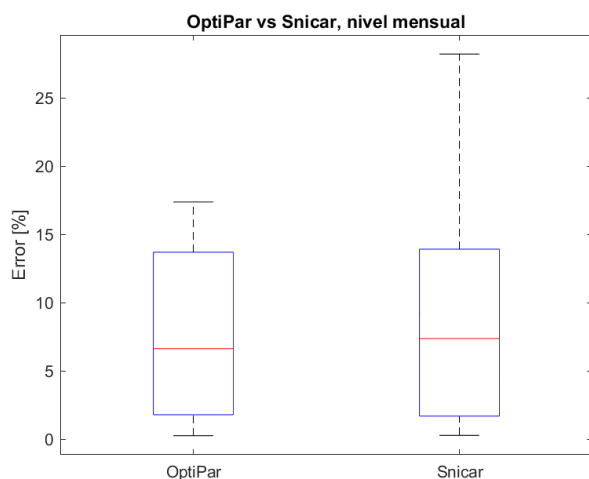


Figura 32. Errores porcentuales entre softwares, Cuenca Río Yeso, nivel mensual.

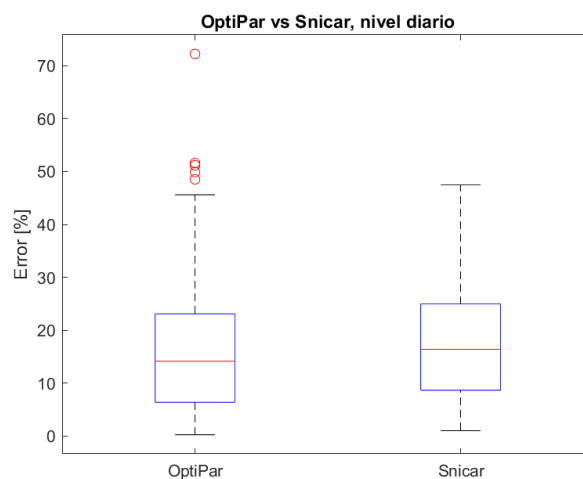


Figura 33. Errores porcentuales entre softwares, Cuenca Río Yeso, nivel diario.

El primer gráfico corresponde al análisis realizado a nivel mensual en el cual se presenta un error menor a 13,7% con la modelación en OptiPar y un error menor a 13,9% a través de Snicar, ambos válidos para el 75% de los datos. Además, en el gráfico de la derecha se realiza el estudio a escala diaria, se obtiene un error menor a 23,1% con OptiPar y un error menor a 25% mediante Snicar en el 75% de los datos. Estas diferencias de error no son tan significativas como las obtenidas en la cuenca anterior, sin embargo, se mantiene el programa OptiPar como el que da valores más precisos. La Tabla 11 muestra los indicadores de dispersión referentes a esta cuenca.

Tabla 11. Análisis de comparación entre softwares, cuenca Río Yeso.

Parámetro	Escala de tiempo mensual		Escala de tiempo diaria	
	OptiPar	SNICAR	OptiPar	SNICAR
Valores superiores a datos en terreno [%]	63,33	35,10	60,87	31,88
Valores inferiores a datos en terreno [%]	36,67	64,90	39,13	68,12
Error promedio [%]	7,45	8,56	17,93	16,61
Desviación estándar [%]	5,76	7,30	9,82	15,15
Mediana [%]	6,63	7,37	14,12	16,39
Percentil 75 [%]	13,70	13,92	23,08	24,95

En la Tabla 11 se ve que en la cuenca Río Yeso OptiPar también logra imponerse ante SNICAR pese a tener menor cantidad de datos disponibles para estudiar, pues SNICAR presenta mayores desviaciones estándar con relación a OptiPar.

Luego, las Figuras 34 y 35 corresponden a gráficos con los albedos modelados por ambos softwares y el albedo medido por el radiómetro.

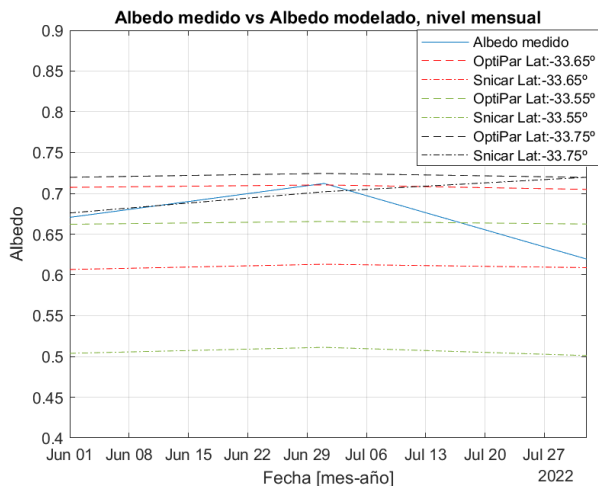


Figura 34. Comparación Albedo medido y modelado, Cuenca Río Yeso, nivel mensual.

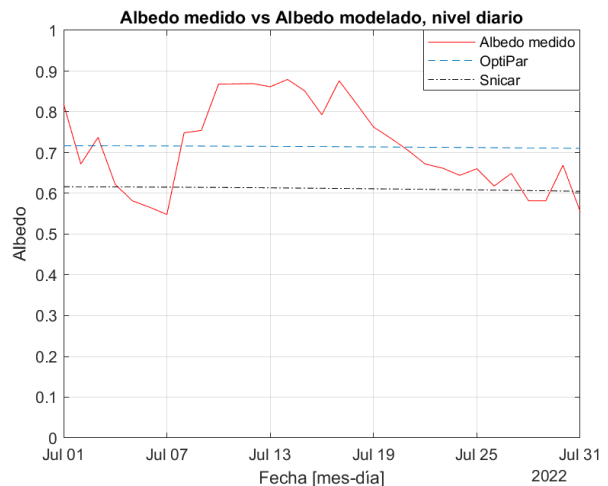


Figura 35. Comparación Albedo medido y modelado, Cuenca Río Yeso, nivel diario.

10.6 Relación entre albedo medido y albedo modelado

Se estudia la relación que pueda existir entre el albedo medido por los radiómetros de las plataformas Nunatak y el albedo que se obtiene al modelar el Black Carbon extraído del satélite CAMS, esta modelación se realiza a través de OptiPar utilizando el método de cálculo de Bohren & Huffman – Mountain-Mullholland y los parámetros de entrada definidos anteriormente.

La finalidad de este análisis es encontrar una ecuación que permita acercarse aún más al valor de albedo real existente en la nieve de las cuencas estudiadas y representarlo de la mejor manera posible.

En la Figura 36 se observa la relación entre el Albedo Medido y el Albedo Modelado en escala temporal diaria para la cuenca Río Juncal antes Estero Juncalillo y Junta Río Blanco.

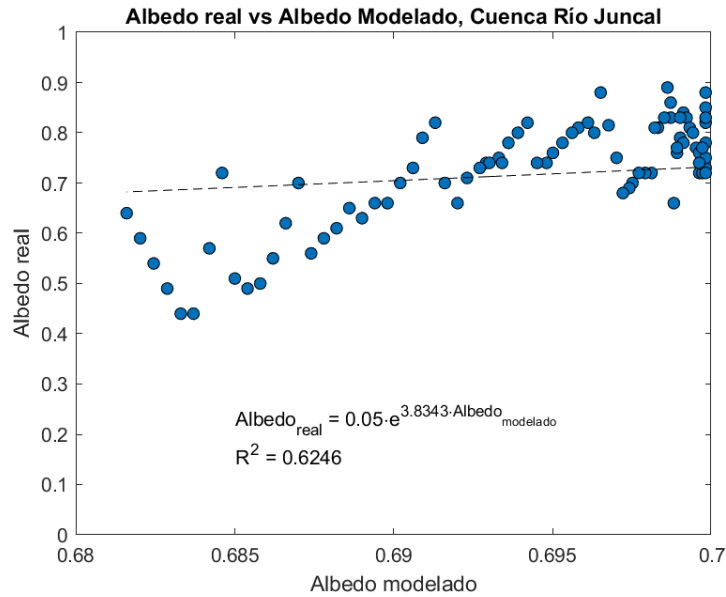


Figura 36. Relación entre Albedo Medido y Albedo Modelado, cuenca Río Juncal.

La tendencia de los datos indica que la mejor representación entre albedo real medido y modelado es exponencial y queda expuesta en la Ecuación (17).

$$Albedo_{real} = 0.05 \cdot e^{3.8343 \cdot Albedo_{modelado}} \quad (17)$$

La Ecuación (17) tiene un coeficiente de determinación (R^2) de 0,6246, lo cual se considera aceptable. Además, la ecuación es válida para todo el rango de albedo modelado.

Del mismo modo, se realiza el análisis para encontrar una correlación entre albedo medido y modelado, esta vez para la cuenca Río Yeso. En la Figura 37 se observan los resultados.

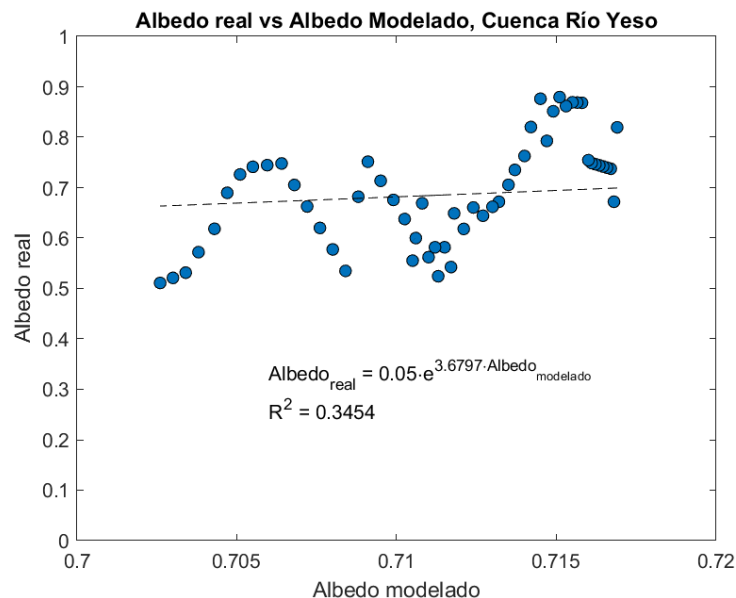


Figura 37. Relación entre Albedo Medido y Albedo Modelado, cuenca Río Yeso.

Los datos de esta cuenca indican que la mejor representación entre albedo real medido y modelado es exponencial y se muestran en la Ecuación (18).

$$Albedo_{real} = 0,05 \cdot e^{3,6797 \cdot Albedo_{modelado}} \quad (18)$$

La Ecuación (18) tiene un coeficiente de determinación (R^2) de 0,3454, por lo tanto, la correlación es menos precisa que la encontrada en la cuenca anterior, sin embargo, se observa que los coeficientes de la Ecuación (17) y (18) son similares y del mismo orden de magnitud.

Una observación importante de las Figuras Figura 36 y Figura 37 es el rango del albedo modelado pues este es de 0,68 a 0,7 en la Cuenca Río Juncal, y de 0,7 a 0,72 en la Cuenca Río Yeso. Esta baja variación en el rango puede deberse, en primer lugar, a la poca variabilidad que tienen los datos satelitales en el tiempo como se ve en la Figura 8 y en la Figura 9. También influye la resolución temporal mensual de los datos satelitales, pues al hacer un análisis diario, es necesario repetir estos valores para todos los días del mes, por lo que al hacer la modelación de albedo, el único parámetro que aporta variabilidad es el ángulo cenital.

En la Figura 38 se observa la distribución por mes en la relación entre albedo medido y albedo modelado, en ella se distingue que el mes de junio es el que presenta menor dispersión de datos, mientras que agosto es el mes que más dispersión tiene. Esto tiene una clara coherencia con lo que se ilustra en la Figura 39 que muestra la dispersión del ángulo cenital para los distintos meses, mostrando que junio y agosto son los meses con menor y mayor variabilidad, respectivamente.

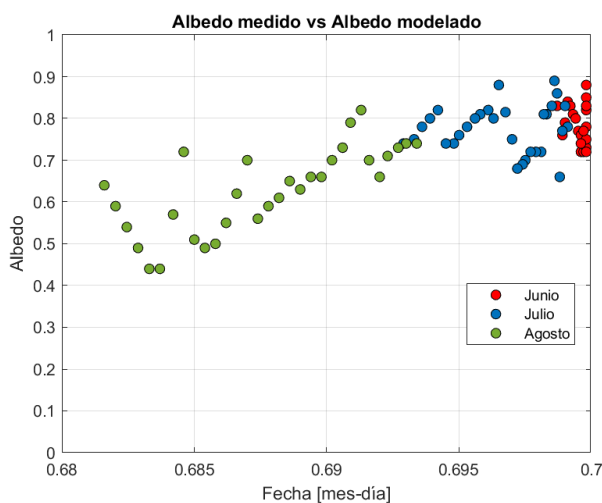


Figura 38. Relación Mensual entre Albedo medido y albedo modelado, cuenca Río Juncal.

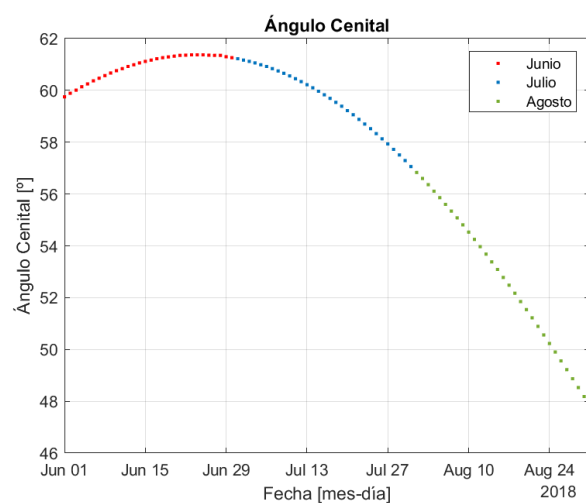


Figura 39. Variación mensual del ángulo cenital, cuenca Río Juncal.

11 Conclusiones

Ante la dificultad de la realización de mediciones en terreno, que son costosas y difíciles, la alternativa de modelar el albedo de un manto de nieve que se encuentra contaminada mediante un software que utiliza transferencia de energía es sumamente valiosa para aumentar la precisión de los modelos hidrológicos, adaptándolos y actualizándolos al cambio climático.

De los softwares estudiados OptiPar y SNICAR, en todos los análisis realizados la ventaja la tiene OptiPar, esto puede deberse en gran medida a la flexibilidad que presenta este programa al permitir que el usuario pueda editar una gran cantidad de parámetros, no así SNICAR. Por ejemplo, OptiPar permite caracterizar el entorno de la zona estudiada (nubosidad, ángulo cenital, rugosidad del suelo, etc.), definir el manto de nieve y las partículas de contaminante seleccionado, pudiendo incluso ser más de un contaminante. SNICAR, por su lado, permite definir el entorno y el manto de nieve, pero de una forma más incompleta que OptiPar, y no permite la caracterización de las partículas de contaminante, posibilitando solo a ingresar la cantidad.

Una observación que llama la atención de los datos modelados es que en general las curvas de datos modelados dan lineales, esto se ve claramente en la Figura 30, Figura 31, Figura 34 y Figura 35. La razón de esto radica en el comportamiento cíclico y constante en el tiempo que presentan los datos satelitales, según lo explicado en el capítulo 6, es posible ver que, para un mismo mes, los valores del satélite son muy similares año a año, y la diferencia de concentración de BC solo se hace notoria de una estación a otra.

Con respecto a los datos medidos en terreno, estos presentan gran variabilidad, teniendo un rango de 0,1 a 0,89 en algunos casos. Los datos inferiores a 0,3 fueron eliminados al momento de hacer el análisis con el fin de minimizar errores, ya que datos muy pequeños podrían no ser representativos de albedo de nieve, sino de suelo natural. En este punto, la cuenca Río Yeso resultó desfavorecida ya que cuenta con muchos datos medidos que se aproximan a 0,1, en ese sentido, la cuenca dispone de poca cantidad de datos para hacer comparaciones con los datos modelados, no así la cuenca Río Juncal que tiene una gran disposición de datos. Es por ello que la cuenca Río Juncal se considera más representativa que la cuenca Río Yeso en cuanto a resultados obtenidos.

En la misma línea de los datos medidos en terreno, se tiene que hay datos altos, es decir superiores a 0,85; esto puede indicar presencia de nieve joven o recién caída. En cuanto a los parámetros de entrada definidos en el apartado 9, principalmente se asignaron cualidades de nieve vieja o que lleva mucho tiempo depositada. Esto puede explicar por qué el albedo modelado no llega a valores tan altos como los vistos en terreno. De todos modos, los datos de terreno que resultaron altos son pocos, por lo tanto, se considera que en general la nieve depositada en las cuencas estudiadas lleva un tiempo razonable estando en reposo; esto se confirma con los resultados obtenidos del tamaño de grano (apartado 10.2), pues un tamaño de 0,5 [mm] no es propio de nieve joven.

Por otro lado, y no menos importante, los radiómetros con los que se midieron los datos en terreno, solo se encuentran disponibles en un único punto espacial de cada cuenca y miden el albedo minuto a minuto. Por otra parte, los datos satelitales disponibles de CAMS, dividen la cuenca en píxeles de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ($0.1^\circ \sim 11$ [km]), alcanzando así al menos 10 píxeles en cada cuenca, y la resolución temporal es de una medición al mes. Por lo tanto, se podría decir que las resoluciones temporales y espaciales entre los radiómetros y el satélite son opuestas. Esto dificulta el análisis pues se requiere tomar decisiones que involucren repetición y/o filtración de datos para poder hacer comparaciones que sean razonables. Para futuras investigaciones, se recomienda la utilización de satélites que tengan una resolución temporal y espacial compatible con la fuente de datos con la que se va a comparar, y así, se podrán obtener resultados con mayor disposición de datos reales y precisos.

Finalmente, se recomienda la utilización de OptiPar para la modelación de nieve contaminada por su gran versatilidad y la variedad de contaminantes y variables que se pueden ingresar. Este software se encuentra en constantes mejoras y ha logrado superar ciertos inconvenientes que tenía, como el tiempo de ejecución; hoy en día el programa es de uso simple, rápido, eficiente y preciso.

12 Referencias

- Bohren, C. F., & Huffman, D. R. (1983). *Absorption and scattering of light by small particles*. Canada: Wiley Professional Paperback Edition Published.
- Bohren, C. F., & Huffman, D. R. (1998). *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York.
- Cereceda-Balic, F., Vidal, V., Moosmüller, H., & Lapuerta, M. (2018). *Reduction of snow albedo from vehicle emissions at Portillo, Chile*. Obtenido de Elsevier: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.11.008>
- Chang, H., & Charalampopoulos, T. (1990). *Determination of the Wavelength Dependence of Refractive Indices of Flame Soot*. Obtenido de Royal Society: <https://doi.org/10.1098/rspa.1990.0107>
- Chen, A., Li, W., Li, W., & Liu, X. (2014). *An observational study of snow aging and the seasonal variation of snow albedo by using data from Col de Porte, France*. Obtenido de Chinese Science Bulletin: <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0429-9>
- Clarke, A. D., & Noone, K. J. (1985). Soot in the Arctic Snowpack: A cause for perturbations in radiative transfer. *Atmospheric Environment*, 2045-2053.
- Constantin, J. G., Ruiz, L., Villarosa, G., Outes, V., Bajano, F. N., He, C., . . . Dawidowski, L. (2020). *Measurements and modeling of snow albedo at Alerce Glacier, Argentina: Effects of volcanic ash, snow grain size, and cloudiness*. Obtenido de The Cryosphere: <https://doi.org/10.5194/tc-14-4581-2020>
- Copernicus Atmosphere Monitoring Service. (s.f.). Obtenido de Atmosphere Data Store: <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/#!/home>
- Dobbins, R. A., Mulholland, G. W., & Bryner, N. P. (1994). Comparison of a Fractal Smoke Optics Model With Light Extinction Measurements. *Atmospheric Environment*, 889-897.
- Dumont, M., Arnaud, L., Picard, G., Libois, Q., Lejeune, Y., Nabat, P., . . . Morin, S. (2017). *In situ continuous visible and near-infrared spectroscopy of an alpine snowpack*. Obtenido de The Cryosphere: <https://doi.org/10.5194/tc-11-1091-2017>
- Figuerola-Villanueva, L., Castro, L., Bolaño-Ortiz, T., Flores, R., Pacheco-Ferrada, D., & Cereceda-Balic, F. (2023). *Changes in Snow Surface Albedo and Radiative Forcing in the Chilean Central Andes Measured by In Situ and Remote Sensing Data*. Obtenido de Water: 10.3390/w15183198
- Flanner, M. G., Arnheim, J. B., Cook, J. M., Dang, C., He, C., Huang, X., . . . Zender, C. S. (2021). *SNICAR-ADv3: a community tool for modeling spectral snow albedo*. Obtenido de Geoscientific Model Development: <https://doi.org/10.5194/gmd-14-7673-2021>
- Flanner, M. G., Zender, C. S., Randerson, J. T., & Rasch, P. J. (2007). *Present-day climate forcing and response from Black Carbon in snow*. Obtenido de Journal of Geophysical Research: doi:10.1029/2006JD008003
- Giddings, J. C., & LaChapelle, E. (1961). *Diffusion theory applied to radiant energy distribution and albedo of snow*. Obtenido de Journal of Geophysical Research: <https://doi.org/10.1029/JZ066i001p00181>
- González-Correa, S., & Lapuerta, M. (2021). *Revisión de Métodos para el Cálculo de las Propiedades Ópticas de Aglomerados de Hollín*. Ciudad Real.
- González-Correa, S., Gómez-Doménech, D., Ballesteros, R., Lapuerta, M., Pacheco-Ferrada, D., Flores, R., . . . Cereceda-Balic, F. (2022). *Impact of Vehicle Soot Agglomerates on Snow Albedo*. Obtenido de Atmosphere: <https://doi.org/10.3390/atmos13050801>
- Hadley, O., & Kirchstetter, T. (2012). *Black-carbon reduction of snow albedo*. Obtenido de Nature Climate Change: 10.1038/nclimate1433

- Hansen, J., & Nazarenko, L. (2003). Soot climate forcing via snow and ice albedos. *National Academy of Sciences*, 423-428.
- Irvine, W. M. (1964). *Light Scattering by Spherical Particles: Radiation Pressure, Asymmetry Factor, and Extinction Cross Section*. Obtenido de Journal of the Optical Society of America: <https://doi.org/10.1364/JOSA.55.000016>
- Lapuerta, M., González-Correa, S., Ballesteros, R., Cereceda-Balic, F., & Moosmüller, H. (2022). *Albedo reduction for snow surfaces contaminated with soot aerosols: Comparison of experimental results and models*. Obtenido de <https://doi.org/10.1080/02786826.2022.2091975>
- Liou, K. N. (2002). *An Introduction to Atmospheric Radiation*. California: Elsevier Science.
- Liu, F., Yon, J., & Bescond, A. (2015). On the radiative properties of soot aggregates – Part 2: Effects. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 134-145.
- Macke, A., Mueller, J., & Raschke, E. (1996). Single Scattering Properties of Atmospheric Ice Crystals. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2813-2825.
- Mariraj Mohan, S. (2015). An overview of particulate dry deposition: measuring methods, deposition velocity and controlling factors. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 387-402. Obtenido de International Journal of Environmental Science and Technology.
- MOP, & DGA. (2008). *Manual de Nieve y Nivometría*. Santiago: Geostudios Ltda.
- Pomeroy, J. W., & Gray, D. M. (1995). *Snowcover: Accumulation, relocation and management*. Obtenido de National Hydrology Research Institute Science Report.
- Rubio, S., & Lapuerta, M. (2018). *Modelado de la reflectancia de superficies nevadas contaminadas con partículas de hollín*. Ciudad Real.
- Stull, V. R., & Plass, G. N. (1960). *Emissivity of Dispersed Carbon Particles**. Obtenido de Journal of the Optical Society of America: <https://doi.org/10.1364/josa.50.000121>
- Toon, O. B., McKay, C. P., Ackerman, T. P., & Santhanam, K. (1989). Rapid calculation of radiative heating rates and photodissociation rates in inhomogeneous multiple scattering atmospheres. *J. Geophys*, 16287-16301.
- Venegas, A., & Flores, R. (2022). *Aplicación del Modelo OptiPar para la obtención del albedo de nieve en mantos contaminados con Black Carbon*. Valparaíso.
- Warren, S. G. (Febrero de 1982). Optical properties of snow. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 67-89. Obtenido de Reviews of Geophysics and Space Physics: <https://doi.org/10.1029/RG020i001p00067>
- Warren, S. G., & Brandt, R. E. (2008). *Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: A revised compilation*. Obtenido de Journal of Geophysical Research: <https://doi.org/10.1029/2007JD009744>
- Warren, S. G., & Wiscombe, W. J. (1980). A model for Spectral Albedo of Snow. II: Snow Containing Atmospheric Aerosols. *Journal of Atmospheric Science*, 2734-2745.
- Warren, S. G., & Wiscombe, W. J. (1980). A Model for the Spectral Albedo of Snow. I: Pure Snow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2712-2733.
- Yang, P., & Fu, Q. (2009). Dependence of ice crystal optical properties on particle aspect ratio. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 110, 1604-1614.

13 Anexos

13.1 Procedimiento de Modelación en OptiPar

En este apartado se describe el procedimiento a realizar en OptiPar para modelar un manto de nieve contaminado con Black Carbon, mostrando la secuencia de pantallas y separando entre la definición del manto y el contaminante, en este caso, Black Carbon u Hollín (denominado así por el software).

En la Figura 45 se puede observar el resultado final de la modelación, donde en la zona inferior derecha de la ventana se ilustra un gráfico comparativo del albedo en el manto limpio y contaminado.

Definición del manto de nieve



Figura 40. Selección de la fuente de luz - Definición del manto de nieve.

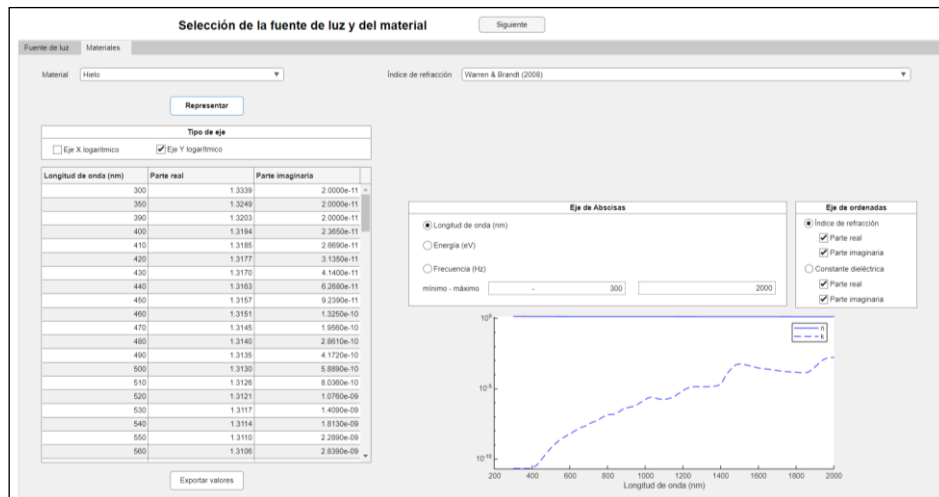


Figura 41. Selección del material (Hielo) - Definición del manto de nieve.

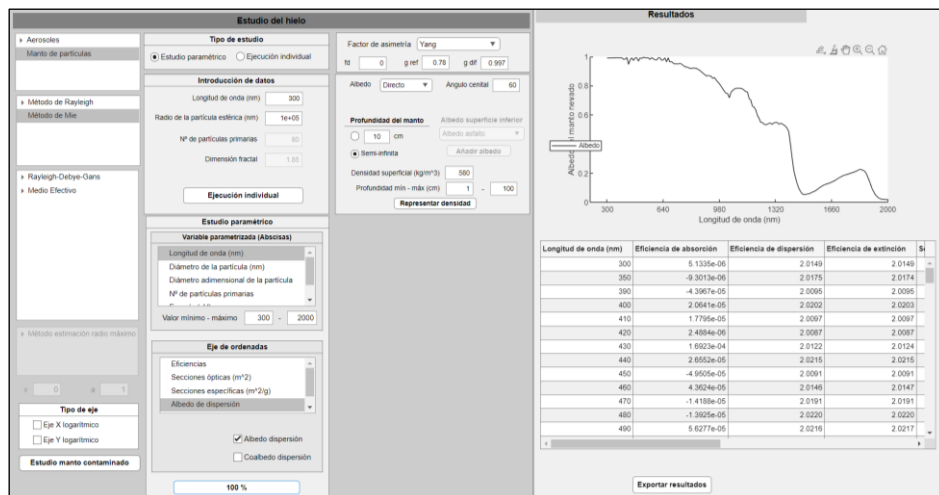


Figura 42. Introducción de parámetros y Resultados - Definición del manto de nieve.

Definición del contaminante

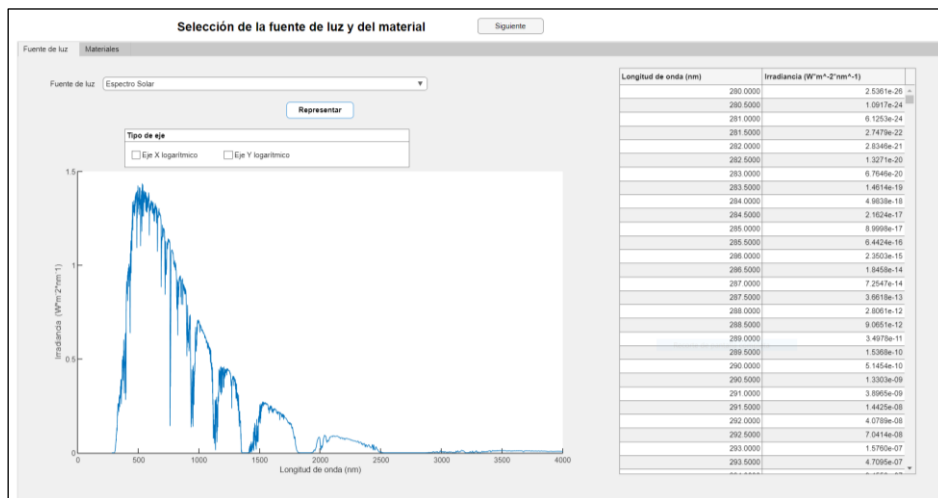


Figura 43. Selección de la fuente de luz - Definición del contaminante.

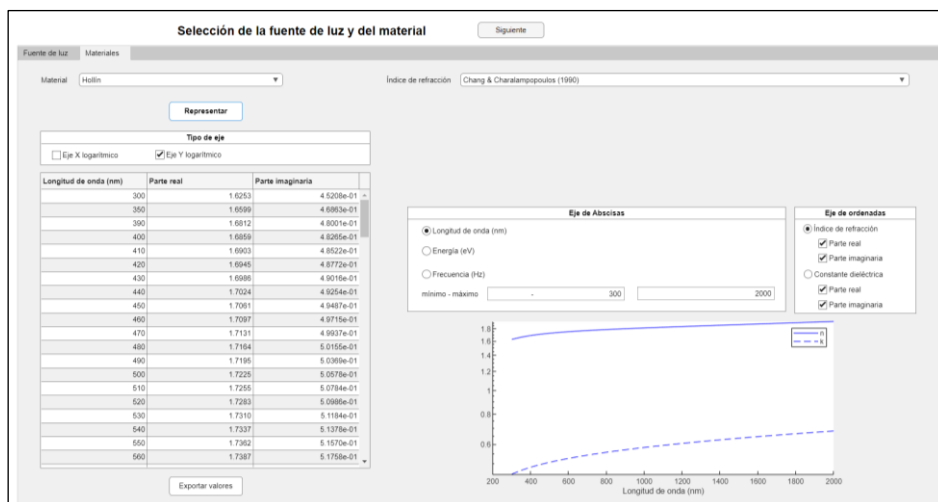


Figura 44. Selección del material - Definición del contaminante.

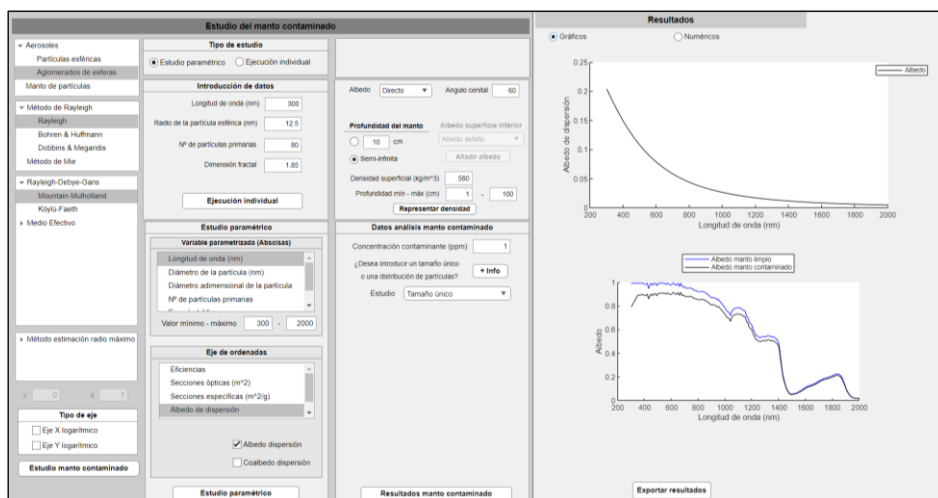


Figura 45. Introducción de parámetros y Resultados - Definición del contaminante.