

# Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación Sierra de Guadarrama

## Efectos de un alud de nieve sobre la Laguna Grande de Peñalara. Nuevos parámetros morfométricos

### INFORME



Año 2022

**CONSEJERIA DE MEDIOAMBIENTE, VIVIENDA Y AGRICULTURA**  
DIRECCION GENERAL DE BIODIVERSIDAD Y RECURSOS NATURALES

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN, SEGUIMIENTO Y EVALUACION**  
PARQUE NACIONAL DE LA SIERRA DE GUADARRAMA

*Efectos de un alud de nieve sobre la Laguna Grande de Peñalara. Nuevos  
parámetros morfométricos*

**Autores**

**Ignacio Granados.** CISE

**Manuel Toro.** Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX

**Coordinación**

**Juan A. Vielva Juez.** Responsable del Centro de Investigación (CISE)

# Efectos de un alud de nieve sobre la Laguna Grande de Peñalara. Nuevos parámetros morfométricos

---

V3\_septiembre 2022

## Índice

PREFACIO.....	4
1. Antecedentes y justificación .....	5
2. Metodología .....	6
3. Resultados .....	9
3.1. Extensión y recorrido del alud .....	9
3.2. Condiciones meteorológicas previas .....	11
3.3. Efecto sobre la cubierta de hielo .....	16
3.4. Efecto en la columna de agua .....	21
3.5. Cambios en el sedimento. Nueva batimetría.....	24
4. Bibliografía .....	28
Anexo 1 – Evolución de la cubierta de hielo tras el alud .....	29

## Figuras

Figura 1. Ecosonda FURUNO 4300, utilizada en la batimetría de 1991 y la de 2018. ....	7
Figura 2. Transectos realizados y puntos empleados en la batimetría original de 1991 y repetidos posteriormente en 2018 para evaluar los cambios en el sedimento.....	7
Figura 3. A) Plataforma flotante para alojar la ecosonda y el dispositivo móvil de posicionamiento GPS; B) Realizando uno de los barridos. ....	8
Figura 4. a) Vista 3D del alud de la Canal Central del Circo de Peñalara. b) Superficie y recorrido de la avalancha sobre el Modelo Digital del Terreno de 2m. ....	10
Figura 5. Vista de la Canal Central desde la morrena que cierra la laguna. Puede observarse tanto la cubierta de hielo de la laguna fracturada como un gran acumulo de nieve a la salida de la Canal Central. ....	11
Figura 6. Temperatura atmosférica y precipitación diaria durante el mes de marzo de 2018. ....	12
Figura 7. Velocidad y dirección del viento en los 10 días previos al alud de la Canal Central del Circo de Peñalara. ...	12
Figura 8. Estimación del espesor de nieve realizado por AEMET para a) el 14 de marzo, 5 días antes del alud; y b) el 21 de marzo. En la zona de salida del alud se midió un espesor de 180 cm el 14 de marzo y 250 cm en el mismo punto siete días después. ....	13
Figura 9. Espesor de nieve en el Puerto de los Cotos durante el mes de marzo de 2018. ....	14
Figura 10. Detalle de las condiciones ambientales durante el alud de la Canal Central basado en los datos horarios (dirección del viento) o 10-minutales (resto de variables). Variables de viento en la estación RMPNSG Los Cotos, resto de variables en la estación RMPNSG Las Hoyas. ....	15
Figura 11. Espesor de nieve acumulado el 21/03/2018 a la entrada de la Hoya de la Laguna de Peñalara (1.940 m s.n.m.).....	16
Figura 12. (a) Perspectiva de la Laguna de Peñalara el 21 de marzo de 2018, y (b) detalle de la acumulación irregular de nieve y hielo.....	17
Figura 13. Partes de la cubierta de hielo fracturadas y volteadas.....	18
Figura 14. (a) Marcas de la ola de agua generada al impactar el alud sobre la laguna, evidenciando también el arrastre de sedimento. (b) Bloque de hielo procedente de la laguna encontrado a unos 100 m de distancia de esta. ....	19
Figura 15. Caudal registrado en la estación de aforos del Arroyo de la laguna de Peñalara, situado a unos 470 m aguas abajo de la laguna.....	20
Figura 16. a) Temperatura de la columna de agua durante a) el mes de marzo (media y rango diario) y b) momento del alud en las horas centrales del 19 de marzo (datos diez-minutales). ....	21
Figura 17. a) Saturación de oxígeno disuelto a 4m de profundidad durante a) el mes de marzo (media y rango diario) y b) durante el 19 y 20 de marzo (datos bihorarios).....	22
Figura 18. a) Conductividad a 4m de profundidad durante a) el mes de marzo (media y rango diario) y b) durante el 19 y 20 de marzo (datos bihorarios).....	23
Figura 19. Batimetrías por interpolación TIN con los puntos de profundidad (n=201) de 1991 y 2018. ....	24
Figura 20. Diferencia entre las batimetrías de 1991 y 2018.....	25
Figura 21. Cambio en la profundidad de la laguna de Peñalara entre de 1991 y 2018 siguiendo el eje principal del recorrido del alud. ....	25
Figura 22. Batimetría realizada en 2020 con mayor resolución que las de 1991-2018.....	27

## PREFACIO

La Laguna Grande de Peñalara, localizada en el Macizo de Peñalara junto a un conjunto interesante de humedales, cuya importancia le hizo merecedores de ser reconocidos como Humedales de Importancia Internacional por RAMSAR, presentaba, al ser declarado el parque natural de la Cumbre, Circo y Lagunas de Peñalara en 1990, un preocupante deterioro ambiental fruto del abandono y del uso inadecuado.

Para poder iniciar una gestión adecuada, se encarga en 1992, por la Comunidad de Madrid al Departamento de Ecología de la Universidad Autónoma de Madrid, la redacción de unas bases limnológicas, que lideraron los profesores Toro y Montes, cuyas directrices de gestión se han venido aplicando, junto a otras iniciativas, hasta la fecha. Bases que incluían el abordar estudios paleolimnológicos que eran novedosos en España.

Para determinar el alcance del deterioro ambiental de entonces, e iniciar las labores de restauración de la Laguna Grande, no se mermaron esfuerzos. Se llegó a instalar sobre la laguna helada un ingenioso aparato, traído por un equipo de investigadores de la Base Antártida. Con el fin de extraer un core o muestra de sedimento de dos metros (para datar el fondo del cuenco lagunar) muestral que se fileteó y distribuyó por varias universidades para su estudio.

Con aquella actuación, pensábamos que todo lo teníamos ordenado, y datado, en lo que se refería al sedimento del vaso de la Laguna Grande, pero no era cierto, un impresionante alud a finales del invierno del 2.018 golpeó violentamente sobre la laguna removiendo hielo y sedimento, poniendo todo “patas arriba” para demostrar una vez más que la naturaleza es temida y caprichosa.

Pero como de todo hay que sacar la parte buena, este suceso, este fenómeno natural extraordinario, nos ha proporcionado una buena oportunidad para abundar en el conocimiento de estos fenómenos.

De todo lo que nos ilustra el presente informe elaborado por dos excelentes limnólogos muy conocedores de Peñalara.

JUAN VIELVA JUEZ  
RESPONSABLE DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN.

## 1. Antecedentes y justificación

Durante el invierno 2017-2018 se registraron precipitaciones de nieve por encima de lo habitual en la Sierra de Guadarrama. Como consecuencia de estas condiciones meteorológicas, el 19 de marzo de 2018 se produjo un alud en el Circo de Peñalara que alcanzó la laguna de Peñalara, destrozó la cubierta de hielo y llegó a remover parte del sedimento de la laguna. Además, el impacto generó una gran ola que recorrió unos 150 metros aguas abajo de la laguna de Peñalara.

El Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama lleva realizando un seguimiento limnológico mensual de la laguna Grande de Peñalara desde el año 95. Por ello, se consideró necesario conocer cómo habría afectado el alud al sedimento de la laguna, ya que su papel es esencial en muchos de los procesos químicos y biológicos de la masa de agua, así como de registro paleolimnológico de la historia de la laguna. Pero, además, dado que la laguna se encontraba siendo monitorizada en continuo durante la avalancha, se abre una excelente oportunidad para analizar en detalle cómo este tipo de sucesos naturales inusuales pueden afectar al funcionamiento de los ecosistemas acuáticos de montaña.

De esta manera, el presente informe tiene los siguientes **objetivos**:

- Describir las condiciones meteorológicas que desencadenaron la avalancha
- Describir con gran detalle el efecto de un alud de nieve sobre las características físicas y químicas de la columna de agua, gracias a los termistores y multisondas instalados en ella mientras se producen. Hasta donde sabemos, es la primera vez que se describe.
- Evaluar cómo la avalancha de nieve ha redistribuido el sedimento de la laguna de Peñalara, generando una nueva batimetría que permita establecer los nuevos parámetros morfométricos a partir de ella, y evaluar la magnitud de los cambios en la cubeta lacustre.

## 2. Metodología

Los datos meteorológicos proceden de la Red Meteorológica del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama (PNSG, 2021).

La temperatura del agua se ha registrado mediante una cadena de registradores acuáticos de temperatura (*HOBO Water Temp Pro v2*, resolución: 0.02°C, precisión:  $\pm 0.21^\circ\text{C}$ ) situados a cinco profundidades (0.5m, 1m, 2m, 3m y 4m) en el punto de máxima profundidad de la laguna. En ese mismo punto se encontraba ubicada una sonda multiparamétrica (*In-Situ Troll 9500 pro*) a 4 m de profundidad, registrando oxígeno disuelto (sensor óptico, resolución: 0.01 mg/l, precisión:  $\pm 0.1$  mg/l) y conductividad (precisión:  $\pm 0.5\%$  o 2  $\mu\text{S/cm}$ ). En la estación de aforos de la Hoya de Peñalara (unos 470m aguas abajo) estaba situado un sensor de presión subacuático (*Level Troll 400*) para medir el caudal del arroyo de la laguna a partir del nivel del agua (rango 0-11 m, resolución:  $\pm 0.005\%$ , precisión:  $\pm 0.05\%$ ). Los datos de nivel se han corregido para la presión atmosférica gracias a otro sensor de presión instalado fuera del agua en la estación (*In-Situ Rugged Troll 100*). La frecuencia de la toma de datos es cinco-minutal para los sensores de presión, diez-minutal para los registradores de temperatura y bi-horaria para la sonda multiparamétrica.

En 1991 se realizó la primera batimetría de la laguna de Peñalara, mediante una ecosonda FURUNO 4300 en profundidades mayores de 1.5 m y con una sonda manual a menores profundidades (Toro y Montes, 1993). El 10 de agosto de 2018 se volvió a realizar una batimetría con la misma ecosonda y configuración (Figura 1), repitiendo 18 de los 22 transectos realizados el año 1991. Las profundidades registradas con la ecosonda en 1991 y 2018 (con diferente nivel del agua en la laguna) se corrigieron respecto al máximo anual de la laguna (establecido por un punto de referencia en una de las piedras del litoral). Para la realización de las batimetrías se eliminaron los puntos coincidentes con una roca de gran tamaño sumergida, ya que pequeñas variaciones en la localización implican grandes cambios en la profundidad. De esta manera, se obtuvieron 201 puntos (Figura 2) de profundidad comunes y comparables para 1991 (27 años antes del alud) y 2018 (inmediatamente después del alud).



Figura 1. Ecosonda FURUNO 4300, utilizada en la batimetría de 1991 y la de 2018.

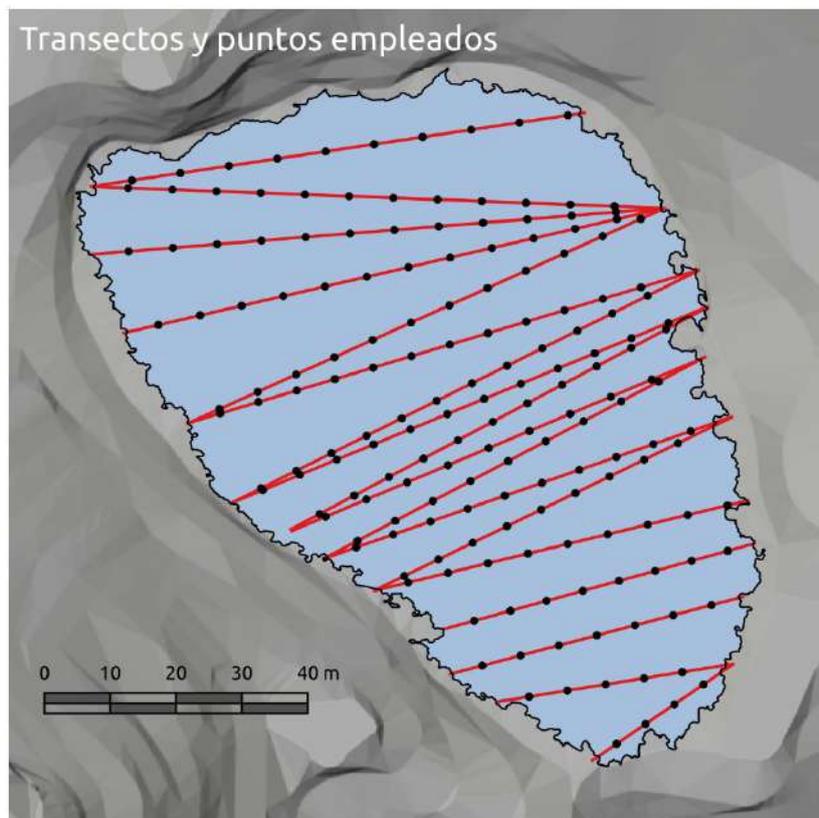


Figura 2. Transectos realizados y puntos empleados en la batimetría original de 1991 y repetidos posteriormente en 2018 para evaluar los cambios en el sedimento.

Posteriormente el 7 de octubre de 2020, se volvió a realizar una batimetría de la laguna pero en esta ocasión empleando una ecosonda georreferenciada de alta precisión. Concretamente, se empleó una Deeper CHIRP+ Smart Sonar configurada con haz estrecho (675 kHz, ángulo cónico de 7°) que permite medidas de profundidades superiores a 15 cm con un error de 1 cm. El barrido de la ecosonda se realizó recorriendo diversos transectos con una pequeña plataforma flotante en la que iba alojada la ecosonda y el dispositivo móvil emparejado (modo bote) para asegurar la conexión wifi entre ellos y mejorar el posicionamiento GPS. La plataforma se desplazaba mediante sendos carretes de cordino manejados por dos personas situados en orillas opuestas de la laguna (Figura 3). Los datos obtenidos se exportaron al software QGIS 3.14 (QGIS Development Team, 2021) para la realización de una validación de los puntos obtenidos comparándolos con los transectos identificados en campo, descartándose los puntos redundantes o con coordenadas dudosas asociadas a un mayor error temporal en el GPS, quedando finalmente una nube de 1677 puntos válidos para la batimetría de 2020.

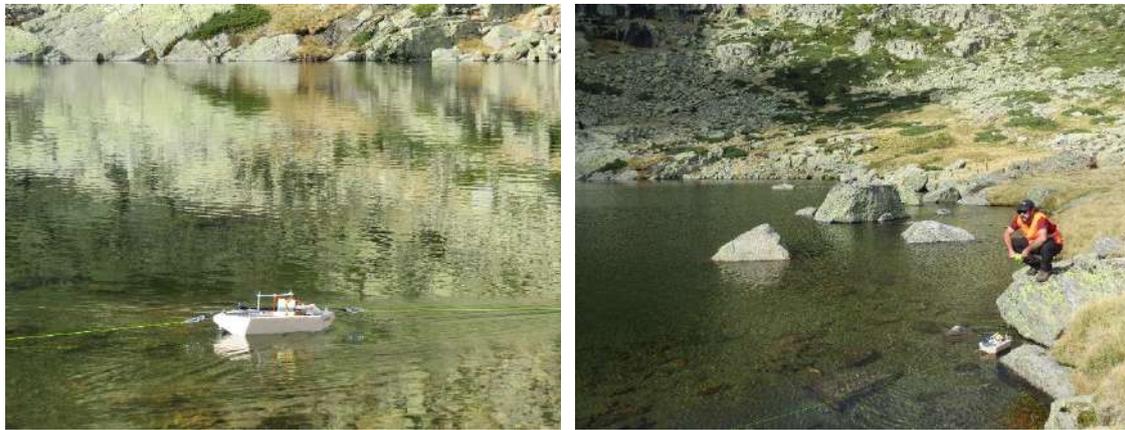


Figura 3. A) Plataforma flotante para alojar la ecosonda y el dispositivo móvil de posicionamiento GPS; B) Realizando uno de los barridos.

Las batimetrías de cada año se obtuvieron mediante interpolación TIN en QGIS 3.14 de los puntos validados y el límite del perímetro digitalizado de la laguna trazado sobre la ortofoto de 2014. Las curvas de nivel se obtuvieron por extracción desde el ráster de la batimetría (algoritmo *Curvas de nivel*), y los perfiles de profundidad con el complemento *Profile tools* sobre una línea arbitraria siguiendo el eje más probable del recorrido del alud. Para conocer los cambios en la distribución del sedimento de la laguna se han calculado los cambios entre las capas ráster de la batimetría de 1991 y la de 2018 (algoritmo *Raster surface volumen*). La generación de isolíneas de profundidad a partir del ráster con el software GIS, genera en ocasiones pequeñas aberraciones o ángulos con una geometría no natural, por lo que ha sido necesario realizar una revisión detallada de todas ellas, corrigiendo y suavizando la geometría con la herramienta de edición de vértices.

### 3. Resultados

#### 3.1. Extensión y recorrido del alud

El 19 de marzo de 2018 se produjo un alud en la Canal Central del Circo de Peñalara, que alcanzó la laguna de Peñalara y destruyó la cubierta de hielo. La avalancha generó una gran presión sobre la masa de agua en la zona NW de la cubeta lacustre, removiendo y depositando parte del sedimento de la laguna sobre los restos de la cubierta de hielo. Además, la presión ocasionada por el impacto generó una gran ola hacia el SE que recorrió unos 150 metros aguas abajo de la laguna de Peñalara.

La Figura 4 muestra la localización y recorrido del alud en el Circo de Peñalara. La avalancha abarcó desde unos 2270 m s.n.m. en el borde del Circo de Peñalara (zona de La Ceja) hasta los 2017 m s.n.m. de la Laguna Grande de Peñalara. Así, la avalancha presentó un desnivel de unos 250 m y un recorrido de algo más de 515 m (pendiente del 48.5%). Aparentemente, según lo observado tanto dos días después del alud como tras la retirada del manto nival, consistió básicamente en una avalancha de nieve sin apenas arrastre de materiales de la cuenca. Por ello, se trató de un alud de placa de superficie, en el que generalmente una capa de nieve nueva débilmente adherida a la capa de nieve más antigua desliza sobre esta última. Casi con toda seguridad el alud se produjo de manera espontánea o quizá por la sobrecarga producida por la caída de la cornisa de nieve acumulada en La Ceja, cuyos restos eran observables en la parte superior de la zona del alud.

Afectó a una superficie de unos 55.000 m<sup>2</sup>, siendo destacable que la orografía propicia que todo el flujo de la avalancha se concentre a través de la Canal Central acumulando un espesor de nieve considerable en la base de la canal (Figura 5). Se desconoce el volumen de nieve movilizado, al no tener mediciones de los espesores previos y posteriores al alud en la zona de la Canal Central-La Ceja. La zona donde se desencadenó el alud estaba considerada como de riesgo alto o muy alto conforme características orográficas y ecológicas (Fernández-Cañadas López-Peláez, 2014). Concretamente presenta pendientes de más de 30°, ausencia de vegetación arbórea, presencia de zonas de acumulación y orientación este. En esta zona concreta ya se habían producido más aludes, aunque ninguno conocido de esta extensión. Es más, para el Macizo de Peñalara la longitud media de los aludes observados es de 194 m y sólo el 17% supera los 300 m, mientras que la superficie media afectada por los aludes es de 13.837 m<sup>2</sup>, aunque el 57% de los aludes observados no alcanzan este valor (Fernández-Cañadas López-Peláez, 2014).

Un alud de tales dimensiones era relativamente poco esperable dado que la previsión de riesgo de aludes realizada por el Grupo de Predicción y Vigilancia de AEMET para los días 16 a 18 de marzo lo situó en un riesgo *Limitado – Nivel 2 sobre 5*. El boletín emitido apuntaba a la acumulación de nieve nueva durante el fin de semana y a que, aunque el descenso de temperaturas formaría costras de rehelo que darían estabilidad al manto, en cotas altas la nieve

reciente se mantendría seca, poco cohesionada y fácilmente movilizable formando placas por el fuerte viento y pudiendo colapsar ante sobrecargas débiles. El 22 de marzo AEMET emitió un aviso específico por peligro de aludes en la zona del parque nacional (pasando a riesgo *Notable – Nivel 3 sobre 5*), que indicaba que entre el viernes 16 y el miércoles día 21 había continuado el paso de borrascas acompañadas de frentes asociados, dejando nevadas frecuentes, originando frecuentes estratos de nieve granulada, poco cohesionada y bastante inestable.

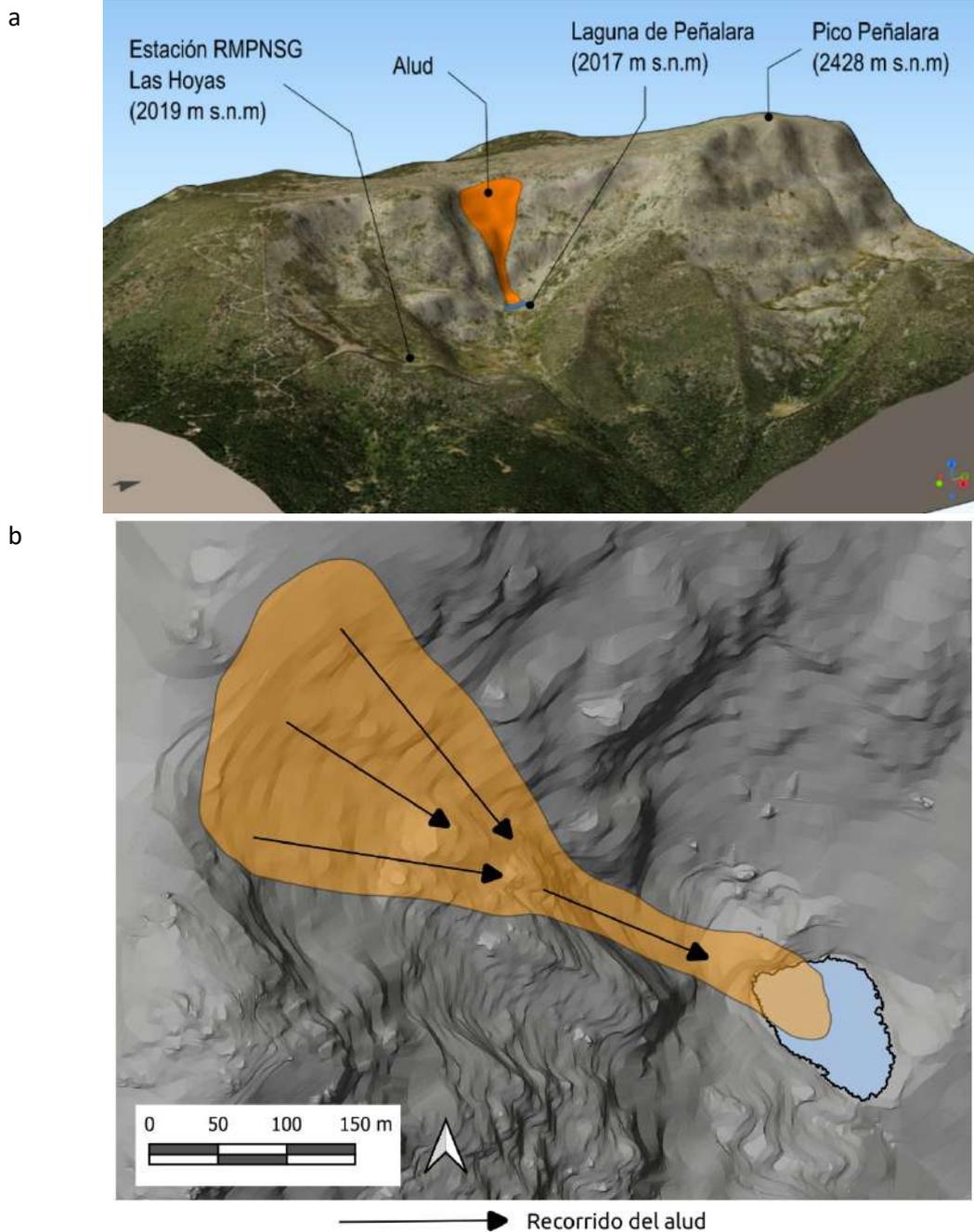


Figura 4. a) Vista 3D del alud de la Canal Central del Circo de Peñalara. b) Superficie y recorrido de la avalancha sobre el Modelo Digital del Terreno de 2m.

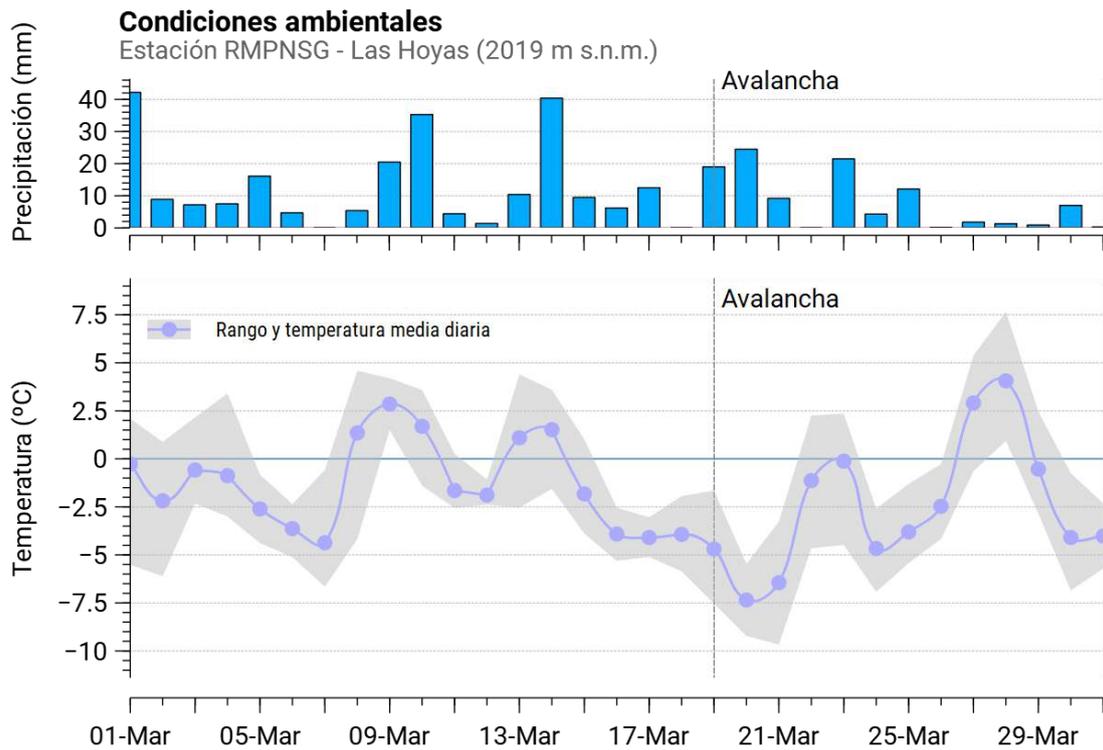


Figura 5. Vista de la Canal Central desde la morrena que cierra la laguna. Puede observarse tanto la cubierta de hielo de la laguna fracturada como un gran acumulo de nieve a la salida de la Canal Central.

### 3.2. Condiciones meteorológicas previas

Además de las características topográficas, las condiciones meteorológicas y el espesor y estado de la nieve son claves para determinar el desencadenamiento de un alud. La Figura 6 muestra la temperatura media y precipitación acumulada diaria durante el mes de marzo de 2018 en la estación meteorológica del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama (RMPNSG) de Las Hoyas, situada a 2019 m s.n.m., a la misma altitud de la Laguna, y a unos 600 m de distancia.

El mes de marzo se caracterizó por temperaturas muy bajas, situándose la mayor parte del tiempo por debajo de los 0°C. La media de los días anteriores a la avalancha fue de -1.30°C y por ello gran parte de la precipitación acumulada fue en forma de nieve en estas cotas altas, aunque el 10 y el 14 de marzo (ligeras subidas por encima de 0 °C) sí se produjo precipitación líquida de acuerdo con los datos de la estación de aforos. La precipitación (sólida y líquida) entre el 1 y 18 de marzo tuvo con una media de 12.9 mm/día y máximos de hasta 42.2 mm, con un total acumulado de 230 litros. Durante ese período los vientos dominantes fueron del suroeste (Figura 7). En el Sistema Central, y en concreto, en el Macizo de Peñalara, las precipitaciones más intensas suelen producirse por advecciones de aire relativamente cálido del tercer cuadrante (Fernández-Cañadas López-Peláez, 2014).



Fuente: CISE - RMPNSG

Figura 6. Temperatura atmosférica y precipitación diaria durante el mes de marzo de 2018.

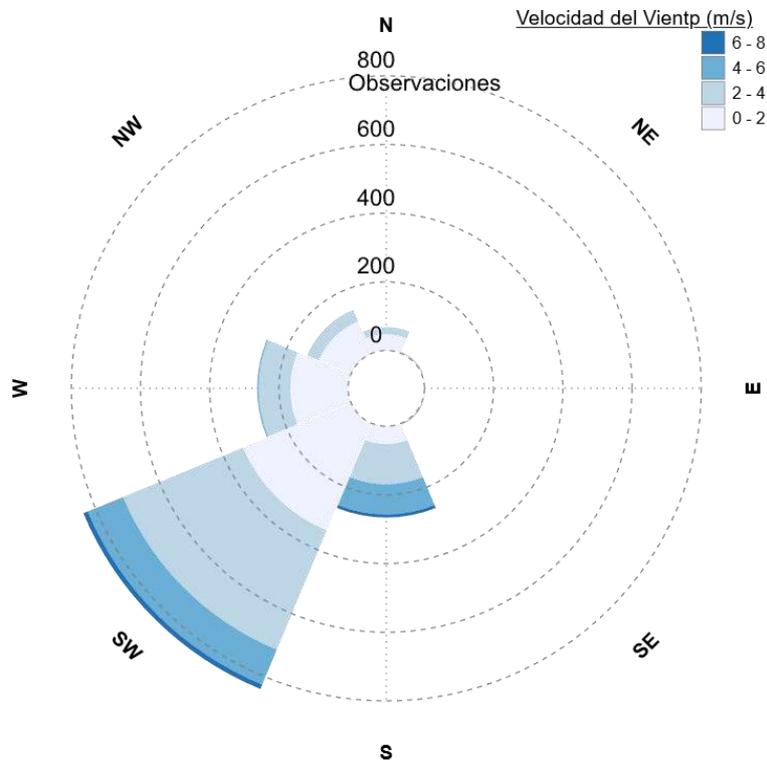


Figura 7. Velocidad y dirección del viento en los 10 días previos al alud de la Canal Central del Circo de Peñalara.

Como resultado de estas condiciones, a mediados de marzo la zona donde se desencadenó el alud tenía más de dos metros de espesor de nieve acumulado (Figura 8a), según AEMET.

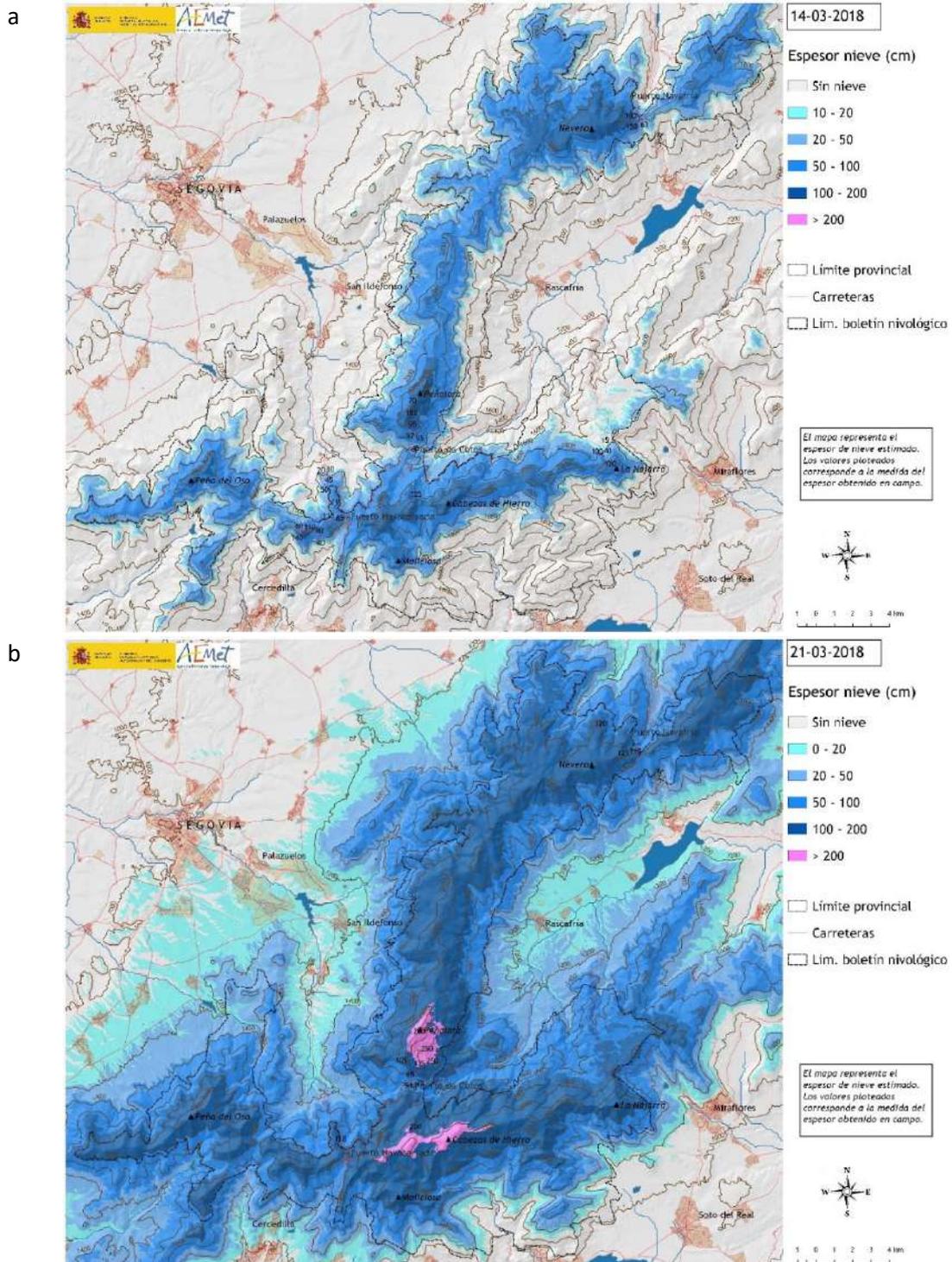
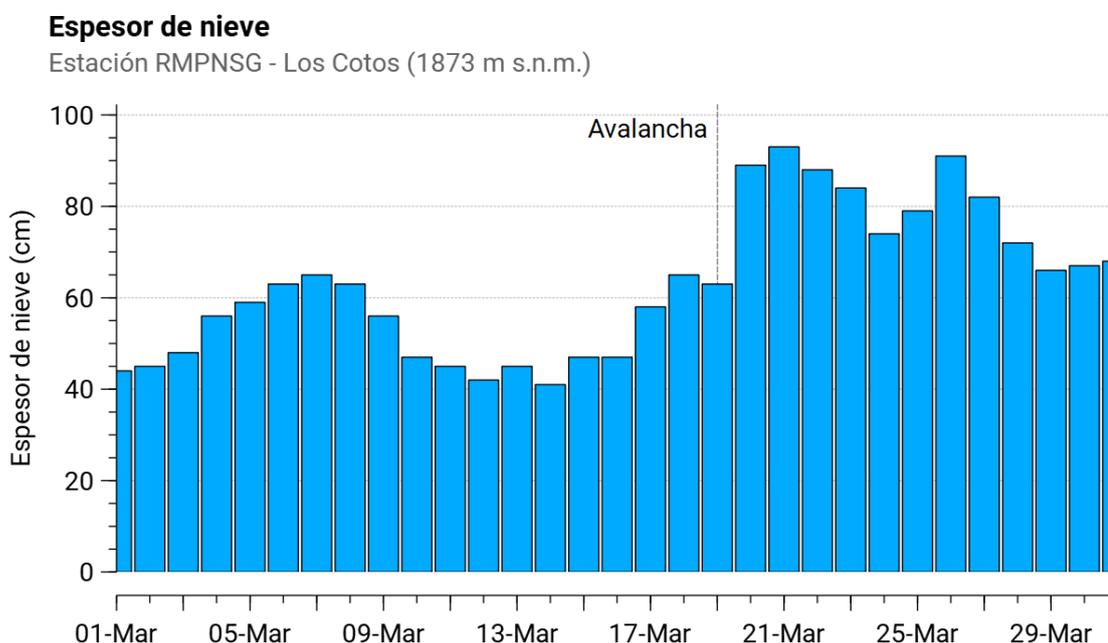


Figura 8. Estimación del espesor de nieve realizado por AEMET para a) el 14 de marzo, 5 días antes del alud; y b) el 21 de marzo. En la zona de salida del alud se midió un espesor de 180 cm el 14 de marzo y 250 cm en el mismo punto siete días después.

La Figura 10 presenta detalladamente los condiciones ambientales previas al alud y durante su desarrollo, al recoger datos 10-minutales de la Red Meteorológica del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama (RMPNSG).

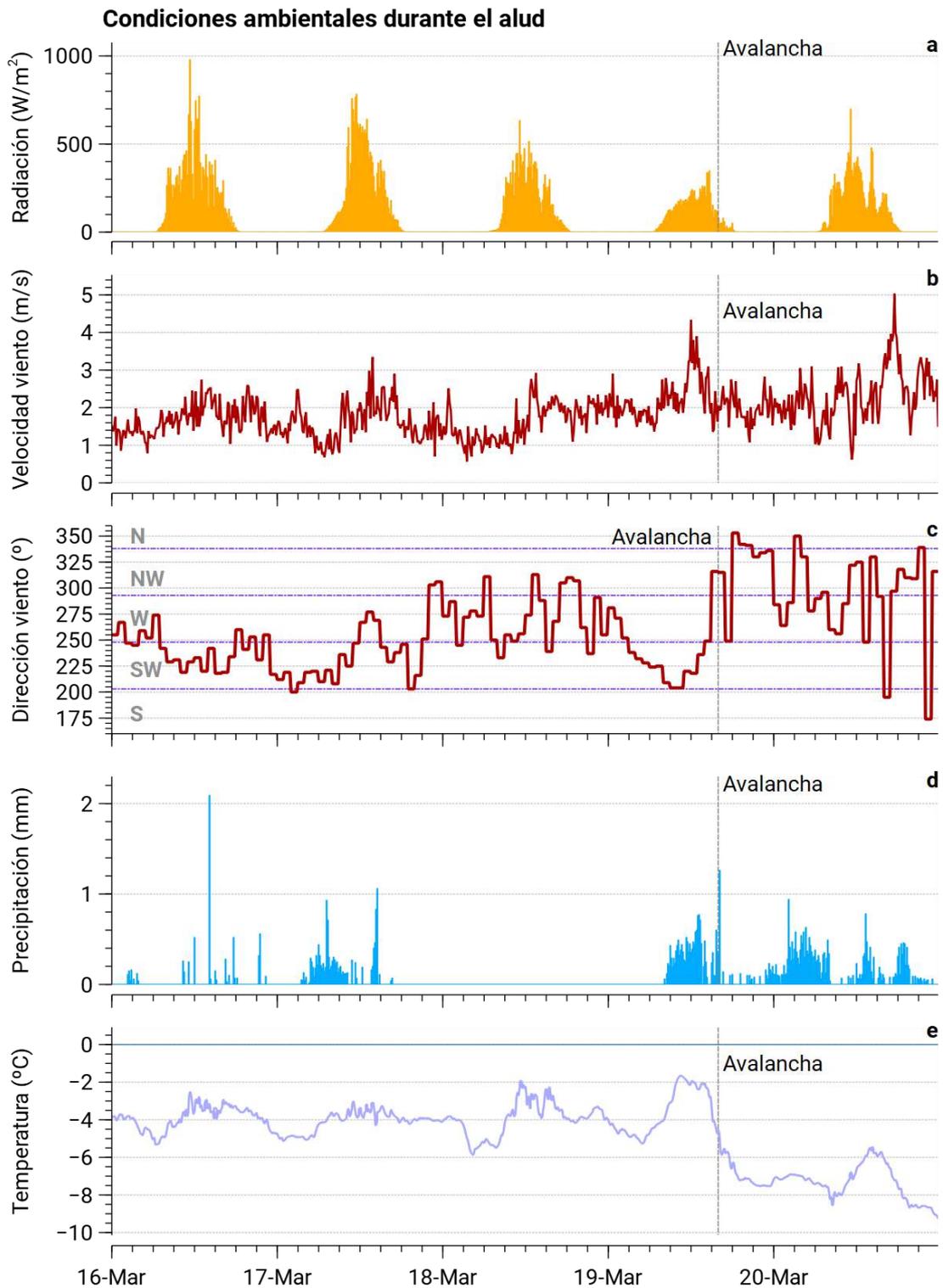
El 16 y 17 de marzo fueron días muy fríos, con temperaturas en torno a los  $-4^{\circ}\text{C}$ , con vientos moderados del SW y nevadas más o menos continuas. El 18 de marzo, el viento roló ligeramente al W-NW cesando las precipitaciones. A lo largo de las primeras horas del día 19 el viento vuelve a rolar al SW con un ligero incremento de la velocidad y subida de la temperatura como consecuencia de la entrada de una masa de aire algo menos fría. Este cambio se corresponde con unas 6-7 horas continuas de precipitación en forma de nieve (unos 15.4 litros) casi hasta el desencadenamiento del alud. En torno a 1 hora antes de producirse la avalancha, el viento vuelve a cambiar claramente a NW-N acompañado de una intensa bajada de la temperatura. Durante todo el día 19 el macizo permanece algo más cubierto que los días anteriores, de acuerdo con los datos de radiación registrados.

Como consecuencia de las nevadas de estos días el espesor de nieve aumentó al menos 70 cm en cotas altas a lo largo de una semana hasta alcanzar los 250 cm (Figura 8b). En el caso concreto de la nevada del día 19, en el puerto de Los Cotos se registró un aumento del espesor del manto nival de 26 cm (Figura 9), que previsiblemente tuvo que ser mayor en cotas superiores a juzgar por la nieve acumulada observada el 21 de marzo (Figura 11).



Fuente: CISE

Figura 9. Espesor de nieve en el Puerto de los Cotos durante el mes de marzo de 2018.



Fuente: CISE - RMPNSG.

Figura 10. Detalle de las condiciones ambientales durante el alud de la Canal Central basado en los datos horarios (dirección del viento) o 10-minutales (resto de variables). Variables de viento en la estación RMPNSG Los Cotos, resto de variables en la estación RMPNSG Las Hoyas.



Figura 11. Espesor de nieve acumulado el 21/03/2018 a la entrada de la Hoya de la Laguna de Peñalara (1.940 m s.n.m.).

### 3.3. Efecto sobre la cubierta de hielo

Se conoce la hora a la que se produjo el alud gracias a los sensores de medición en continuo de temperatura instalados a diferentes profundidades en el punto de máxima profundidad de la laguna. La avalancha se desencadenó minutos antes de las 15:00 UTM del 19 de marzo de 2018. Hasta el día 21 de marzo no se tuvo constancia del suceso, cuando se accedió a la laguna con el objetivo de realizar el muestreo limnológico mensual. En ese momento se observó una acumulación irregular del hielo y nieve en la laguna (Figura 12a), en la que eran claramente visibles grandes trozos de la cubierta de hielo volteados en distintas orientaciones (Figura 12b, Figura 13). Es destacable que el espesor de la cubierta era considerable en el momento del impacto, con una capa de hielo blanco de al menos 50 cm, lo que evidencia que el impacto del alud tuvo que ser lo suficientemente violento como para poder romper una capa de hielo de ese espesor y voltear los trozos resultantes.

Además, en toda la zona de morrena que cierra la laguna eran evidentes marcas de haberse producido un desbordamiento de la laguna generando una arroyada de agua que recorrió gran parte de la hoya de Peñalara (Figura 14a) y que arrastró grandes bloques de hielo de la laguna a decenas de metros de distancia (Figura 14b).



Figura 12. (a) Perspectiva de la Laguna de Peñalara el 21 de marzo de 2018, y (b) detalle de la acumulación irregular de nieve y hielo.



Figura 13. Partes de la cubierta de hielo fracturadas y volteadas.



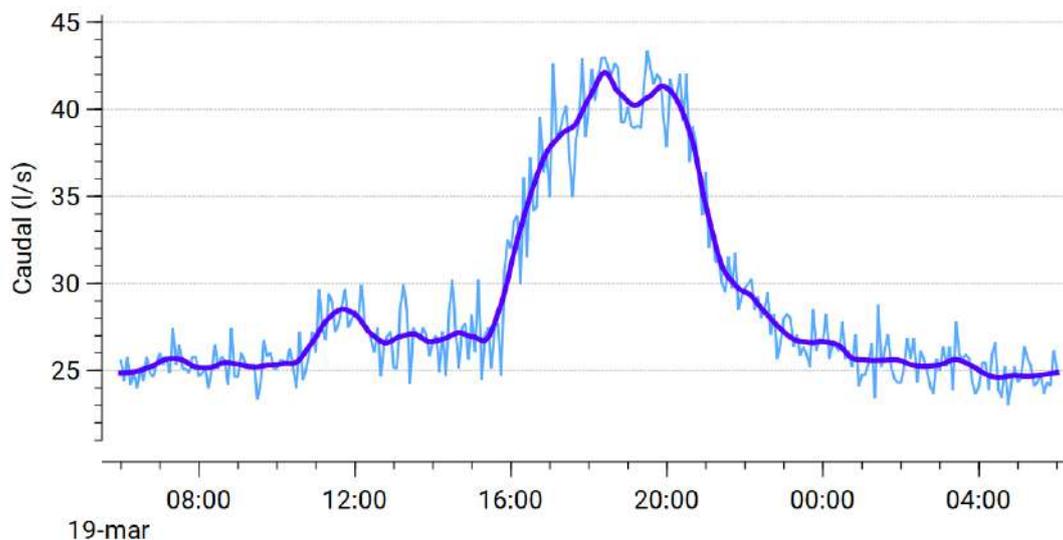
Figura 14. (a) Marcas de la ola de agua generada al impactar el alud sobre la laguna, evidenciando también el arrastre de sedimento. (b) Bloque de hielo procedente de la laguna encontrado a unos 100 m de distancia de esta.

En determinados puntos de la cubierta de hielo se podía observar la presencia de sedimento de la laguna (Figura 13a), si bien gran parte de este sedimento acumulado en la cubierta estaba oculto por nieve acumulada al continuar la nevada después del alud y al día siguiente (Figura 10). No obstante, esta acumulación de sedimento sobre la cubierta de hielo se hizo muy patente a lo largo de la fase de deshielo (Anexo 1 – Evolución de la cubierta de hielo tras el alud, página 29).

La arroyada generada por el desbordamiento se pudo registrar en la estación de aforos del arroyo de la laguna de Peñalara, situada unos 470 m aguas abajo de ésta (Figura 15). Sobre un nivel de base de unos 26.3 l/s, el caudal aumentó hasta un máximo de 43.4 l/s, generando una avenida de 260 m<sup>3</sup> adicionales al caudal de base a lo largo de 9 horas. Esto supone el 2.25% del volumen máximo de la laguna, aunque muy probablemente esta cifra subestime todo el agua que fue arrastrada por el alud.

## Caudal del Arroyo de la Laguna

Estación de aforos de la Hoya de Peñalara



Fuente: CISE

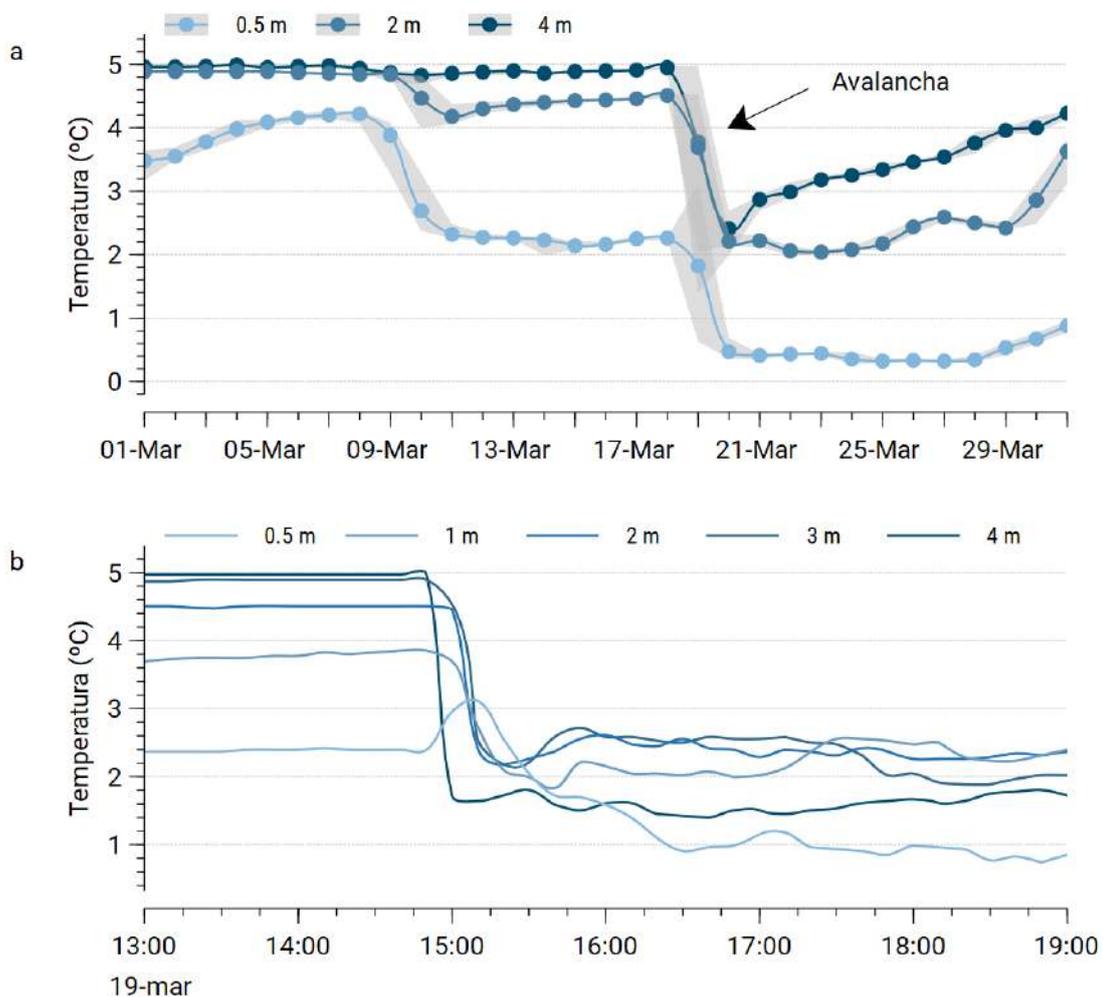
Figura 15. Caudal registrado en la estación de aforos del Arroyo de la laguna de Peñalara, situado a unos 470 m aguas abajo de la laguna.

### 3.4. Efecto en la columna de agua

La Figura 16 muestra los valores de temperatura acuática registrados por la cadena de termistores ubicada en el punto de máxima profundidad de la laguna. Como puede verse, la laguna presentaba una estratificación inversa invernal, mucho más patente al menos desde una semana antes al impacto del alud (Figura 16a). En el instante del impacto de la avalancha, toda esta estratificación inversa se destruye y se produce la mezcla completa de la columna de agua (Figura 16b).

#### Temperatura del agua

Cadena de termistores situada en el punto de máxima profundidad



Fuente: CISE

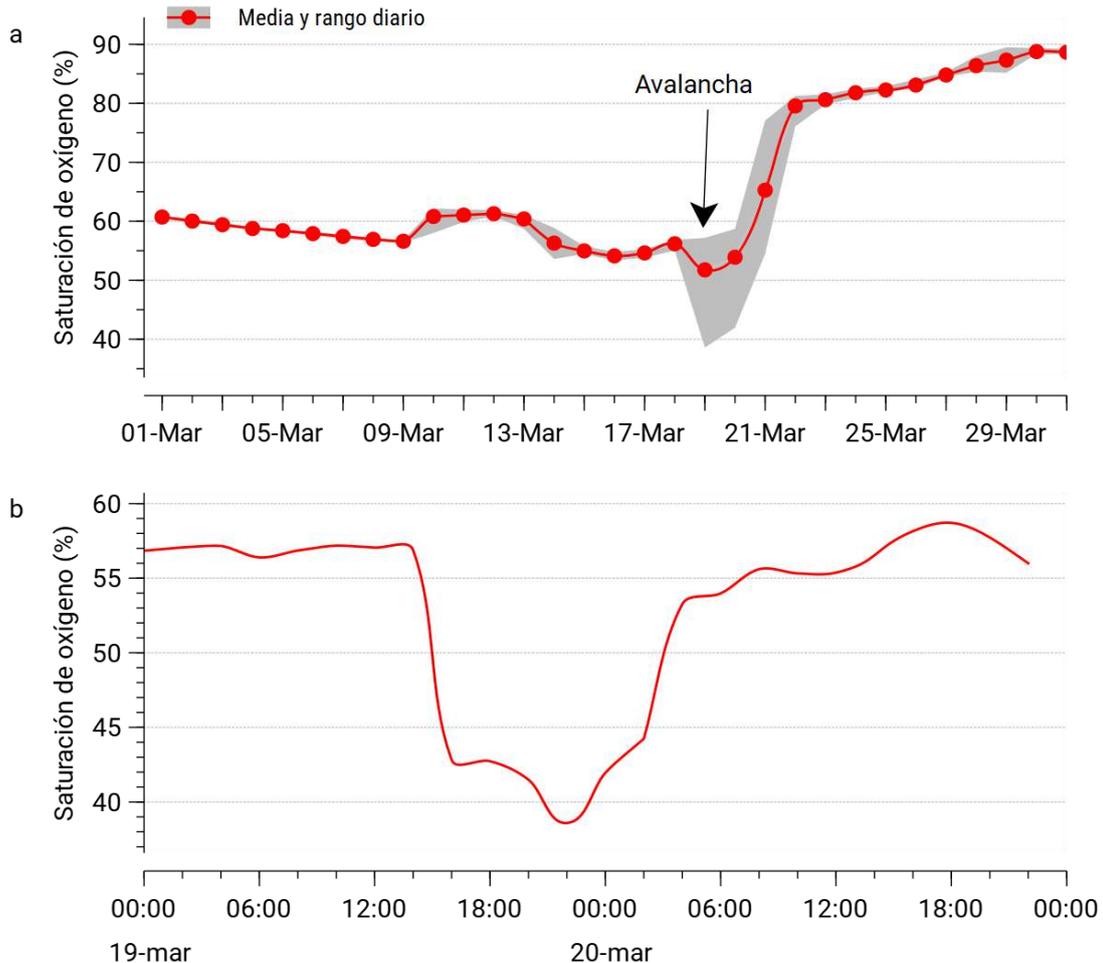
Figura 16. a) Temperatura de la columna de agua durante a) el mes de marzo (media y rango diario) y b) momento del alud en las horas centrales del 19 de marzo (datos diez-minutales).

En el fondo de la laguna (4m) se encontraba una multisonda registrando los valores de oxígeno disuelto (Figura 17) y de conductividad (Figura 18). La laguna se encontraba los días anteriores

al alud en una situación de déficit de oxígeno más o menos estable en torno al 55-60% de porcentaje de saturación (Figura 17a). Esta situación es frecuente bajo la cubierta de hielo invernal, sobre todo si ésta es potente y con nieve acumulada encima que impide el paso de la luz.

## Saturación de oxígeno disuelto

Sonda multiparamétrica situada a 4 m de profundidad



Fuente: CISE

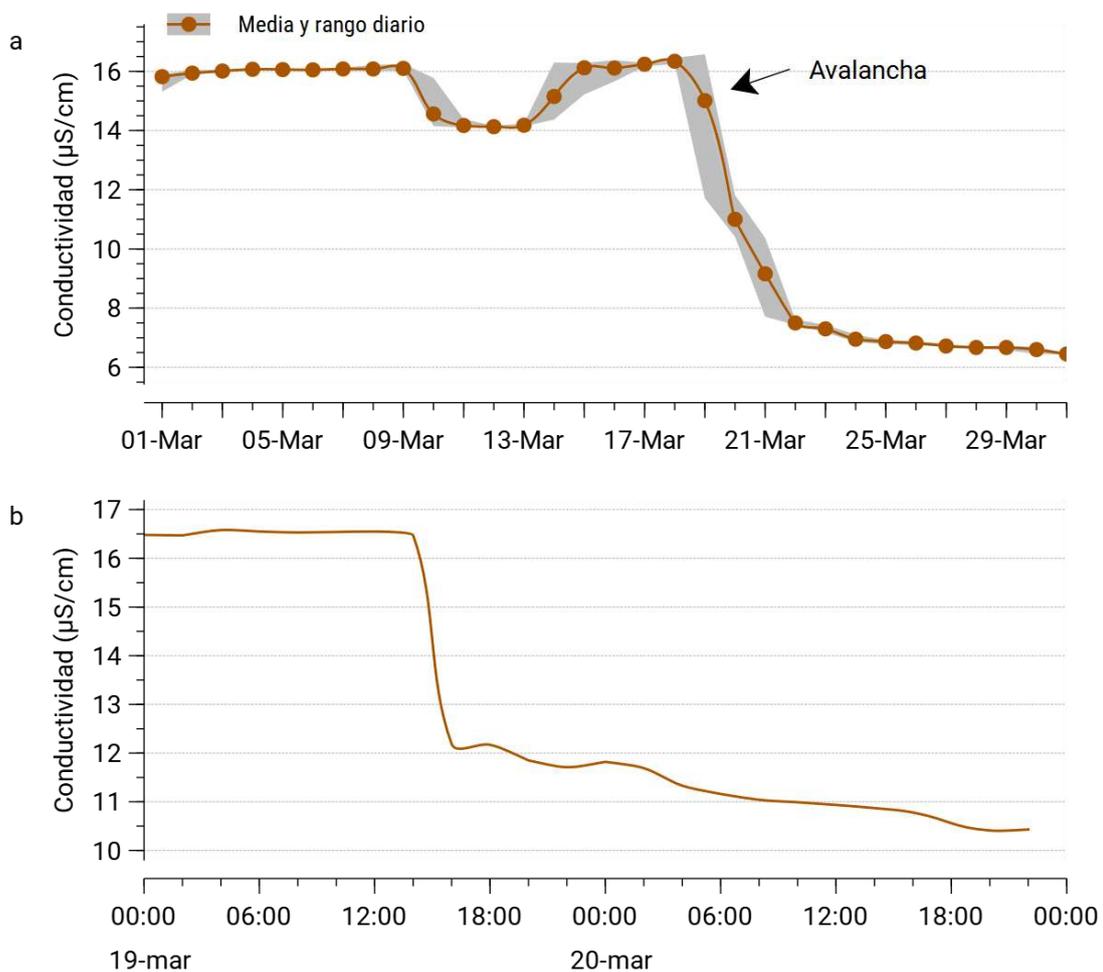
Figura 17. a) Saturación de oxígeno disuelto a 4m de profundidad durante a) el mes de marzo (media y rango diario) y b) durante el 19 y 20 de marzo (datos bihorarios).

Tras el impacto del alud se produce un descenso importante de la saturación de oxígeno (<40%), probablemente por la gran cantidad de sedimento en suspensión, pero en cerca de 24 horas vuelve a situarse en los niveles que tenía (Figura 17b) y de hecho a lo largo de los 3 días siguientes el porcentaje de saturación aumenta rápidamente y algo más lento en días posteriores. Este aumento podría estar relacionado con una mayor facilidad de intercambio de gases entre atmósfera y agua como consecuencia de la rotura de la cubierta de hielo.

En cuanto a la conductividad, los días anteriores al alud la laguna también se encontraba en una situación más o menos estable con valores en torno a los 14-16  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figura 18a). Es una conductividad relativamente alta para esta laguna, pero frecuente en la capas más cercanas al sedimento durante la época con cubierta de hielo invernal. Tras el impacto, la conductividad desciende súbitamente (Figura 18b) al mezclarse la capa de agua más superficial (con muy baja conductividad en época invernal) con la capa de agua de fondo. Esta situación perdurará en el tiempo los próximos días tras el alud.

## Conductividad

Sonda multiparamétrica situada a 4 m de profundidad



Fuente: CISE

Figura 18. a) Conductividad a 4m de profundidad durante a) el mes de marzo (media y rango diario) y b) durante el 19 y 20 de marzo (datos bihorarios).

### 3.5. Cambios en el sedimento. Nueva batimetría.

La Figura 19 muestra las batimetrías de 1991 y 2018 realizadas a partir de los mismos 201 puntos de profundidad en 18 transectos (ver apartado 2).

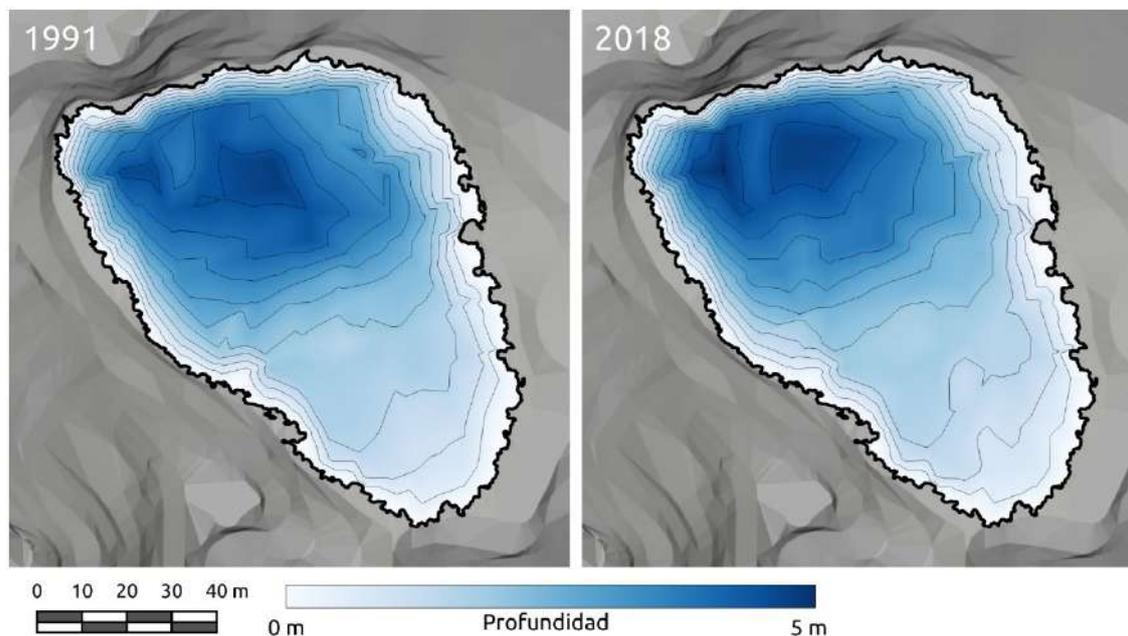


Figura 19. Batimetrías por interpolación TIN con los puntos de profundidad (n=201) de 1991 y 2018.

Se ha calculado la diferencia de ambas batimetrías y se observan importantes cambios entre 1991 y 2018 (Figura 20). Destacan dos grandes áreas: en la parte más próxima a la zona donde impactó el alud (litoral N) se observa una pérdida de sedimento de hasta 0.75 m, mientras que inmediatamente después en el sentido del recorrido del alud es apreciable una acumulación de sedimento de hasta 1 m. En el resto de la laguna se alternan pequeñas zonas de erosión-deposición, pero todas ellas de mucha menor entidad. Muy posiblemente el movimiento del sedimento no se debe al impacto directo de nieve o bloques de hielo, sino por la onda de presión generada al impactar sobre la cubierta de hielo. En cualquier caso hay que destacar cambios significativos relacionados con el proceso natural de sedimentación por haber pasado 27 años entre ambas batimetrías, ya que la media de acumulación de sedimento es menor de 3 mm/año en períodos de baja erosión (morrena recuperada) de acuerdo al informe de *Bases Limnológicas para la Gestión del Sistema Lagunar del Parque Natural de Peñalara* (Toro y Montes, 1993).

Este desplazamiento del sedimento se aprecia muy bien al representar el cambio de la profundidad de la laguna siguiendo el eje del recorrido del alud (Figura 21).

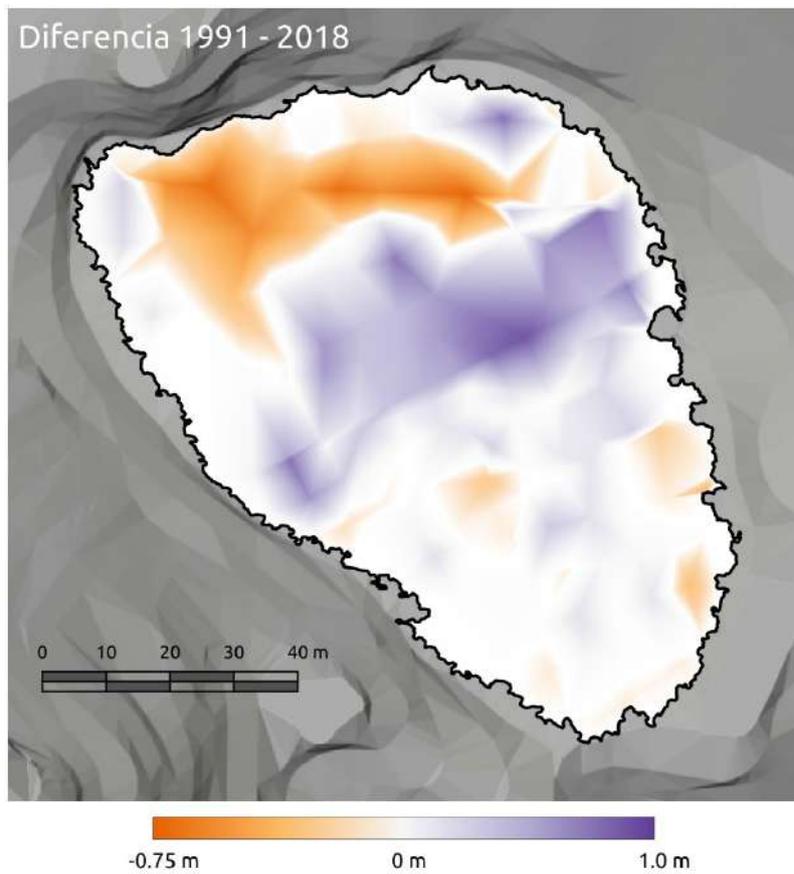


Figura 20. Diferencia entre las batimetrías de 1991 y 2018.

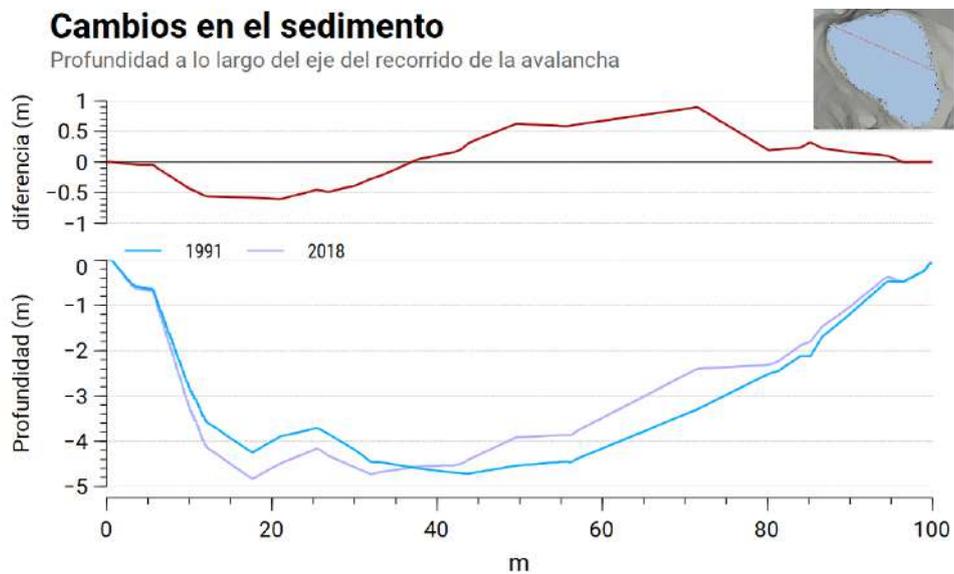


Figura 21. Cambio en la profundidad de la laguna de Peñalara entre de 1991 y 2018 siguiendo el eje principal del recorrido del alud.

A partir de la comparativa de las batimetrías se constata que como consecuencia del alud, al menos 330 m<sup>3</sup> de sedimento han sido removilizados en unos 2025 m<sup>2</sup> del fondo de la laguna (zonas de la laguna con más profundidad en 2018 que en 1991). Por el contrario, se ha observado el depósito de 1035 m<sup>3</sup> sobre unos 4615 m<sup>2</sup> del fondo de la laguna (zonas de la laguna con menos profundidad en 2018 que en 1991). Como se ha comentado en el apartado 3.1, el alud prácticamente no introdujo materiales externos a la laguna (alud solo de nieve). Por ello, la diferencia positiva entre el volumen de material depositado y el removido es debido principalmente a la descompactación que se produce al levantarse el sedimento.

Las batimetrías de 1991 y 2018 (ecosonda Furuno) se han obtenido con una densidad de 0.0297 puntos/m<sup>2</sup>, mientras que la de 2020 (ecosonda Deeper CHIRP+) se ha obtenido con 0.248 puntos/m<sup>2</sup>, por lo que la resolución de la batimetría se ha aumentado en un orden de magnitud. Así, se ha podido obtener una nueva batimetría de la laguna de Peñalara (Figura 22) tras los cambios en la distribución de sedimento consecuencia del alud del 19 de marzo de 2018.

La Tabla 1 muestra los parámetros morfométricos derivados de la batimetría de 2020. Los datos más relevantes es que la actual profundidad máxima de la laguna ha pasado a ser de 5.11 m y su volumen 14930.5 m<sup>3</sup>.

Tabla 1. Variables morfométricas de la laguna Grande de Peñalara actualizadas con la nueva batimetría

Cuenca (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro (m)	Longitud máxima (m)	Anchura máxima (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Profundidad máxima (m)	Profundidad media (m)
476976	6770.7	365.0	123.8	80.7	14930.5	5.11	2.205

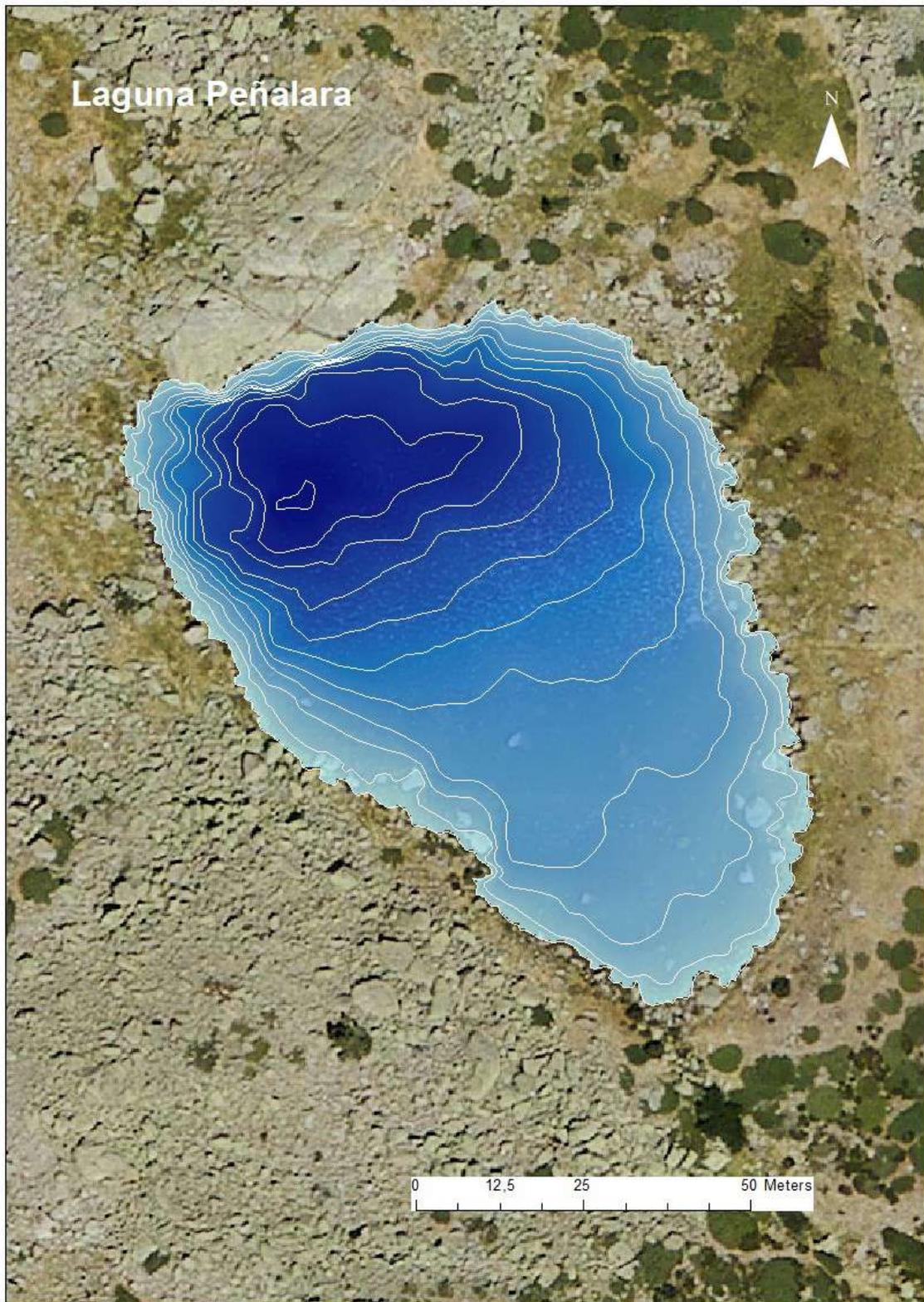


Figura 22. Batimetría realizada en 2020 con mayor resolución que las de 1991-2018.

## 4. Bibliografía

Fernández-Cañadas López-Peláez, J.A.C. 2014. *Los aludes de nieve en el Macizo de Peñalara*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente Agencia Estatal de Meteorología.

PNSG. 2021. Sistema de observación meteorológica. *Web oficial del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama*.

QGIS Development Team. 2021. *QGIS Geographic Information System*. QGIS Association.

Toro, M., Montes, C. 1993. *Bases limnológicas para la gestión del sistema lagunar del Parque Natural de la Cumbre, Circo y Lagunas de Peñalara*. Comunidad de Madrid.

## Anexo 1 – Evolución de la cubierta de hielo tras el alud

21 de marzo



28 de marzo



1 de abril



18 de abril



24 de abril



5 de mayo



11 de mayo



18 de mayo



23 de mayo



28 de mayo

