

PERMATHERMAL

SERIE TEMPORAL

MONITORIZACIÓN TÉRMICA
DE SUELOS CONGELADOS EN
LAS ISLAS LIVINGSTON Y
DECEPCIÓN, ANTÁRTIDA.



Mantenimiento de las estaciones
PT y CALM para el control del
permafrost y la capa activa en las
islas Livingston y Decepción,
Antártida.

Informe de campaña 2022-23



Miguel Ángel de Pablo Hdez.

Unidad de Geología. Facultad de Ciencias.



**Dpto. de Geología, Geografía y Medio Ambiente.
Unidad de Geología.**

Fecha de publicación: Mayo 2023

Publicado por Miguel Ángel de Pablo

Este documento puede ser distribuido libremente bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0):

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Datos de contacto:

Dr. M.A. de Pablo. Unidad de Geología. Dpto. de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Edificio de Ciencias. Campus Científico-Tecnológico. Universidad de Alcalá.

Ctra. A-II PK 33,600. 28871 Alcalá de Henares, Madrid. España.

Tel: (+34) 91 885 4960 / Fax: (+34) 91 885 5090

Correo-e: miguelangel.depablo@uah.es

Aviso: *Este documento es un Informe Técnico y la información que contiene es el resultado del conocimiento y experiencia profesional y científica del equipo investigador, y está basada en los datos disponibles. Los autores no se hacen responsables del mal uso de la información contenida en este documento, ni de las aplicaciones que terceros realicen a partir de la información, datos, resultados y conclusiones aquí presentadas.*

Esta campaña de mantenimiento de la serie temporal PERMATHERMAL ha sido financiada por el Comité Polar Español a través de la Unidad de Tecnología Marina del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Dicha financiación se gestionado a través de un contrato Art.60 Ley Orgánica 2/2023 de 22 de marzo (ref. 2023/068 y código 2023/00117/001) que ha tenido por objeto la realización de las actuaciones correspondientes.

Cite este documento como:

de Pablo, M.A. 2023. Maintenance of PT and CALM stations for permafrost and active layer monitoring on Livingston and Deception Islands, Antarctica. 2022-23 campaign report. (in Spanish). ACMA-Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España. 66 pp. DOI: 10.5281/zenodo.8338315.

Foto de portada y contraportada: Laderas de Punta Barnard, en primer término, y la Península Hurd al otro lado de la bahía Sur, en isla Livingston, Antártida.

Equipo investigador



Redes internacionales



Financiación y logística



CONTENIDO

Introducción.....	1
Una nueva época.....	1
Comienzo y desarrollo de la red	2
La estandarización.....	4
La red	5
La reinstrumentalización	6
Nuevos retos	7
La campaña 2022-23.....	8
Estaciones	9
Localización.....	9
Parámetros	12
Mediciones.....	14
Mantenimiento	14
Datos.....	15
Instrumentación.....	17
Estaciones PT.....	17
Dispositivos de medida.....	17
Temperatura del aire	18
Temperatura de la superficie	19
Temperatura del terreno	19
Espesor de nieve.....	20
Estaciones termométricas automáticas	22
Estaciones CALM	23
Espesor de la capa activa	23
Temperatura del techo del permafrost	24
Temperatura superficial	24
Espesor de cubierta nival.....	25
Otros instrumentos	26

Cámaras fenomenológicas	26
Estación nivométrica	27
Humedad del terreno	28
Movimientos del terreno	29
Campaña antártica 2022-23	31
Desarrollo de la campaña	31
Desarrollo general	31
Personal investigador	31
Calendario de campaña	32
Condiciones meteorológicas	33
Desarrollo de las tareas	33
Consecución de objetivos	34
El estado de las estaciones y mantenimientos realizados	36
Cambios de instrumentación	37
Retirada de instrumentación	37
Instalación de nuevos instrumentos	37
Incidencias	38
Datos del año 2021	39
Generalidades	39
Disponibilidad de datos	40
Temperatura del Aire	43
Temperatura de la nieve	44
Temperatura de la superficie.....	45
Temperatura del terreno	46
Espesor de la capa activa	47
Temperatura del techo del permafrost.....	48
Temperatura superficial distribuida	49
Espesor de cubierta nival distribuida	50

PERMATHERMAL

Parámetros nivométricos	51
Imágenes fenomenológicas	56
Otros datos	58
Planes de futuro.....	60
Mantenimiento de las estaciones	60
Plan de mejora	61
Agradecimientos	62
Referencias	63
Anexo I: Acrónimos	66

Introducción

Una nueva época

La campaña antártica 2022-23 ha supuesto el inicio de una nueva época en la historia de la red PERMATHERMAL para el control térmico de los suelos congelados en las islas Livingston y Decepción de la Antártida, ya que durante la misma se ha completado, prácticamente al 100%, la renovación de la instrumentación de las estaciones térmicas PT (*Permafrost Temperature*) (Streletskiy et al., 2021) asociadas a la Red Terrestre Global para Permafrost (GTN-P), auspiciada por la Asociación Internacional del Permafrost (IPA). Esta renovación comenzó durante la campaña 2021-22 en la que se realizó el cambio de tipo de instrumentos para la medida de la temperatura del aire, de la superficie del suelo y del terreno en prácticamente todas las estaciones de la red. En la campaña 2022-23 se ha completado la renovación con la instalación de sensores para la medida del espesor de nieve. Esta rápida transición ha sido posible a la importante financiación, que ha permitido no dilatar en el tiempo la necesaria modernización de la instrumentación, y la reducción de los tiempos de trabajo requeridos sobre el terreno. De esta forma se termina una primera época de 20 años de duración en la que se ha establecido la red, se ha estandarizado la instrumentación y los métodos de trabajo, y se ha estudiado, además, el efecto de la nieve sobre los suelos congelados (Figura 1), abriéndose así una nueva época con nuevos retos y objetivos científicos por alcanzar.

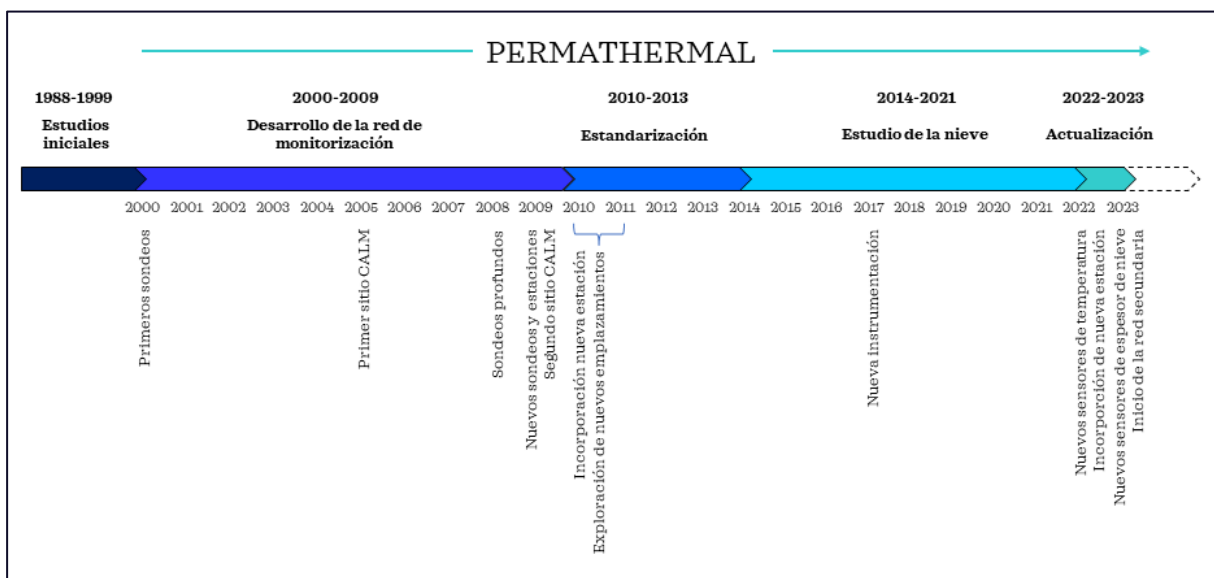


Figura 1: Evolución e hitos en la historia de la red PERMATHERMAL para el control térmico de los suelos congelados en las islas Livingston y Decepción, Antártida (Modificado de de Pablo et al., 2022).

Comienzo y desarrollo de la red

Los estudios iniciales por parte de nuestro grupo de investigación fueron llevados a cabo en las islas Livingston y Decepción de la Antártida desde finales de los años 80 por el hoy Catedrático de Física Aplicada el profesor Dr. Miguel Ramos, de la Universidad de Alcalá. Esos trabajos estaban enfocados a la micrometeorología de la capa límite entre la atmósfera y el suelo, primero en la isla Decepción, y luego en la isla Livingston. Esos primeros años se realizaron trabajos experimentales de verano, aunque en algunas ocasiones se dejaban instalados algunos sensores de temperatura que estuvieron midiendo a lo largo del invierno (ej., Ramos et al., 1994, 2002; Ramos, 1995, 1997, 1998).

En el año 2000 es cuando se comienza un nuevo tipo de estudio con la monitorización continua del régimen térmico de los suelos estacional y permanentemente congelados en las Shetland del Sur. Para ello, en enero de ese año se realizan las primeras perforaciones en las proximidades de la Base Antártica Española Juan Carlos I, en la isla Livingston (Ramos and Vieira, 2003, 2004, 2009), gracias a la financiación por parte del Programa Antártico Español del Plan Nacional de I+D+I (proyecto ANT98-057 y REN2001-5082-E/ANT). Estas perforaciones son las que marcan el inicio de la red de monitorización térmica de los suelos estacional y permanentemente congelados en las islas Livingston y Decepción, hoy denominada red PERMATHERMAL. Estas primeras perforaciones, se realizaron, una en la loma Incinerador, situada cerca de la BAE Juan Carlos I, y la otra en lo alto del monte Reina Sofía, siendo instrumentalizados con sensores a distintas profundidades que median la temperatura a lo largo de todo el año con una frecuencia de una hora. En la realización de estas perforaciones participó un joven estudiante de doctorado de Portugal, el hoy Profesor Dr. Gonçalo Vieira, de la Universidad de Lisboa (Ramos y Vieira, 2003).

Los siguientes años continuaron realizándose trabajos de investigación experimentales de verano, y algunos otros de monitorización térmica de los suelos a lo largo del invierno, pero no de forma sistemática, aunque se ubicaron en emplazamientos donde hoy se encuentran algunas de las actuales estaciones de la red PERMATHERMAL. En el año 2006 comienza la expansión de los puntos de monitorización, ya no solo en la isla Livingston, sino también en la cercana isla Decepción, gracias a la financiación de varios proyectos de investigación (PERMAMODEL POL2006-01918 y CGL2007-28729-E), en colaboración con la

Universidad de Lisboa y la Universidad de Zurich. Distintos investigadores de la Universidad de Alcalá participaron en el establecimiento de estas estaciones de monitorización permanente y sistemática, que trataban de seguir los protocolos de las redes internacionales establecidas por la Asociación Internacional del Permafrost (*International Permafrost Association, IPA*): Control térmico del permafrost (*Thermal State of Permafrost, TSP*, actualmente *Permafrost Temperature, PT*; [Streletskiy et al., 2022](#)) y Monitorización circumpolar de la capa activa (*Circumpolar Active Layer Monitoring, CALM*), dirigidas ambas a entender cual es el estado del permafrost y de la capa activa, y cómo evoluciona en el tiempo en estas regiones circumpolares (aunque luego se ha extendido a otros lugares con condiciones periglaciares del planeta). Ambas redes internacionales, vuelcan sus datos en una base de datos común de la IPA denominada Red terrestre global-permafrost (*Global Terrestrial Network – Permafrost, GTN-P*).

Poco después, en 2008, se realizan las perforaciones más profundas con las que cuenta la red de estaciones de este grupo de investigación, de 25 y 15 m de profundidad en la isla Livingston ([Ramos et al., 2009, 2010a](#)). Estas perforaciones también se realizaron en colaboración del equipo del Dr. Gonçalo Vieira, ya profesor de la Universidad de Lisboa, y responsable de su propio grupo de investigación y de su propia red de monitorización, también en las Shetland del Sur, y otros puntos del sector occidental de la península antártica, denominada red PERMANTAR. Estas perforaciones profundas se realizaron gracias a la financiación por la *Fundação Calouste Gulbenkian* de Portugal.

También en el año 2008 se incorpora al equipo de investigación el actual Profesor Dr. Miguel Ángel de Pablo, de la Unidad de Geología, de la Universidad de Alcalá, quien en los siguientes años toma las riendas de la homogeneización y sistematización de las estaciones existentes, creado también una estación PT y otra CALM en la península Byers de la isla Livingston en el año 2009 ([de Pablo et al., 2010](#)). Ese mismo año se realizan 3 perforaciones nuevas en la isla Decepción, en colaboración con el equipo del Dr. Gonzalo Vieira (Universidad de Lisboa) y Dr. David Gilichinsky† (Academia Rusa de Ciencias), e investigadores de la Universidad de Madison (Estados Unidos) ([Ramos et al., 2010b](#)).

Con estas perforaciones queda definitivamente establecida la red de monitorización de los suelos congelados en las islas Livingston y Decepción, PERMATHERMAL, dentro de las redes y protocolos internacionales del estudio del permafrost y la capa activa PT y CALM.

La estandarización

En el año 2010 comienza una segunda fase de trabajo en torno a estas estaciones, con su estandarización, en cuanto a instrumentación, sensores, periodos de medida, etc., bajo la responsabilidad del Profesor Dr. Miguel Ángel de Pablo y con la colaboración del joven estudiante Antonio Molina, actualmente Investigador Titular en el Centro de Astrobiología (CSIC-INTA).

En los siguientes años se procede, por tanto, a cambiar de posición (algunos metros) algunas de las estaciones que no tenían sondeos asociados, para asegurar una mejor representatividad de los datos adquiridos, así como a instalarse sensores de espesor de nieve (termonivómetros), aire y suelo en todas las estaciones, usando para ello el mismo tipo de sensor para cada una de las mediciones, de tal manera que pudiesen ser comparados. Este proceso de estandarización fue posible gracias a la financiación de los proyectos CGL2008-02042-E/ANT, PERMAPLANET (CTM2009-10165) y ANTARPERMA (CTM2011-15565-E), de la Agencia Estatal de Investigación (AEI).

El final del proceso de homogeneización y estandarización coincide en 2015 con la disolución del Grupo de Investigación de Física Ambiental, dirigido hasta ese momento por el profesor Dr. Miguel Ramos. Ese año el Dr. Miguel Ángel de Pablo comienza a responsabilizarse de la serie temporal y de las estaciones de medida, tomando el actual nombre de red PERMATHERMAL (PERMAforst THERMAL monitoring stations), dentro del Grupo de Investigación de Alto Rendimiento de la Universidad de Alcalá “Agua, Clima y Medio Ambiente”. El mantenimiento de las estaciones se realiza desde este momento con financiación del Comité Polar Español a través de encomiendas y convenios con el Instituto Geológico y Minero de España en primer lugar, y con la Unidad de Tecnología Marina desde 2021.

Concluida la estandarización, se compatibiliza el mantenimiento de las estaciones con el desarrollo del proyecto de investigación PERMASNOW (CTM2014-52021-R) centrado en el estudio, entre 2015 y 2019, del efecto de la nieve en el régimen térmico del permafrost en estas islas antárticas. Como consecuencia de ello se incorporan nuevos instrumentos a la red y se amplían los experimentos temporales, algunos de los cuales se mantienen como parte de la red PERMATHERMAL (de Pablo et al., 2016, 2021).

La red

Tras más de 20 años de trabajo en las islas Livingston y Decepción de la Antártida estableciendo, estandarizando y manteniendo las estaciones de la actual red PERMATHERMAL para el control térmico del permafrost y de la capa activa, así como para la medida del espesor de esta última, el resultado son 2 estaciones CALM y 13 estaciones PT (anteriormente TSP; [Streletskiy et al., 2021](#)), además de una estación nivométrica, 3 cámaras fenomenológicas, y algunos otros instrumentos tomando datos en las duras y complejas condiciones antárticas, en muy diversos emplazamientos. Todas estas estaciones y la amplia distribución de instrumentos en tan solo dos islas pretende permitir la realización de una variedad de estudios, incluyendo: 1) la variabilidad del régimen térmico de los suelos congelados en un gradiente altitudinal mediante las estaciones situadas en la península Hurd de la isla Livingston; 2) el régimen térmico en materiales sedimentarios en condiciones peri- y paraglaciares mediante las estaciones situadas en la península Byers de la misma isla; 3) la variabilidad espacial de corto alcance mediante las estaciones situadas en la isla Decepción; y 4) el régimen térmico general de los suelos en ambas islas. Pero sobretodo, contribuir a la base de datos GTN-P, de la que se alimentan los modelos climáticos, considerando que tanto la temperatura del permafrost, como el espesor de la capa activa son dos variables climáticas esenciales (ecv), tal y como establece, desde 2016, el Sistema de Observación Global del Clima (GCOS) de las Naciones Unidas (UN).

El desarrollo de esta red también ha sido posible gracias a la estrecha colaboración con el equipo de estudio de permafrost del Dr. Gonçalo Vieira de la Universidad de Lisboa, con el apoyo mutuo para el mantenimiento de las estaciones y el análisis de los datos, lo que se refleja en la participación en proyectos del programa portugués como PERMANTAR-2 (FCT/3599-PPCDT/98885/PT), HOLOANTAR (PTDC/CTE-GIX/119582/2010), PERMANTAR-3 (PTDC/AAG-GLO/3908/2012) y THAWIMPACT (2022.06628.PTDC) entre otros, así como en las publicaciones realizadas. Así mismo, el proceso de mantenimiento de las estaciones ha sido realizado por diversos investigadores y colaboradores del equipo, pertenecientes a distintos departamentos de la Universidad de Alcalá, y al apoyo de las dotaciones y técnicos de las Bases Antárticas Españolas “Juan Carlos I” y “Gabriel de Castilla”.

La reinstrumentalización

Durante los primeros 20 años de vida de las estaciones PERMATHERMAL, se constató que los instrumentos y sensores empleados requerían mucho tiempo para el volcado de datos y resultaban en grandes pérdidas de éstos debido a los daños que sufrían los sensores e instrumentos como consecuencia de las duras condiciones ambientales de la Antártida. Por ello, en la campaña 2021-22, y tras varios años de grandes problemas para financiar el mantenimiento de la red, se plantea el objetivo de realizar la completa renovación de la instrumentación, sustituyendo los dispositivos empleados hasta el momento por otros nuevos con mayor resolución, precisión, y autonomía, y menores requisitos de mantenimiento. De esta forma, la red PERMATHERMAL entraría en una nueva época con actividades de campo más sencillas y cortas en duración que permitirá al grupo de investigación enfrentarse a nuevos retos de estudio de los suelos congelados, e incluso la expansión de la red, en las propias islas Livingston y Decepción, o en otros puntos de la zona occidental de la Península Antártica.

Originalmente, las estaciones han estado dotadas de sensores de tipo Tinytag (de la empresa Gemini) para la medida de la temperatura del aire y, en algunos casos, de la temperatura del terreno a distintas profundidades, así como de miniregistradores de datos térmicos de tipo *iButton* (de la empresa Maxim), para el resto de medidas: temperatura de la superficie del suelo, y del terreno a distintas profundidades en el resto de los casos, y de temperaturas a distintas alturas sobre el suelo para poder derivar el espesor de nieve (termonivómetros). Además, algunas estaciones disponían de sondas termométricas con termopares que requerían de registradores de datos tipo CR1000 (de la empresa *Campbell Scientific*) en el interior de cajas estancas, con baterías de 12V y la instalación de paneles solares. Esto resultaba en una gran variedad de tecnologías, cada una de las cuales con sus requisitos de software, cables, y variedad de tareas de mantenimiento, que tomaban una gran cantidad de tiempo de campaña.

Así, en la campaña 2021-22 se inicia el proceso de reinstrumentalización de la red, con un nuevo tipo de dispositivos de mayor capacidad de almacenamiento de datos, mayor resolución de los mismos, y menores requisitos de mantenimiento, con aplicación a la toma de los distintos tipos de datos de temperatura (aire, suelo y terreno).

Nuevos retos

Con la red PERMATHERMAL prácticamente reinstrumentalizada, durante la campaña 2022-23 se aprovecha para planear nuevos retos de investigación asociados al estudio de los suelos congelados. Así, durante esta campaña se instalan nuevos sensores que permitirán estudiar nuevas variables y que, a la luz de los resultados que se obtengan en los siguientes años, se procederá a la instalación en más puntos de la red.

Por un lado, y como consecuencia de la colaboración de nuestro equipo con la red PERMATHERMAL y del grupo portugués de la red PERMANTAR, con el proyecto GACR dirigido por el joven investigador Filip Hrbacek de la Universidad Marsalík de la República Checa, se realiza la instalación de 4 instrumentos para la toma de datos de humedad del suelo a distintas profundidades. Éste es un parámetro escasamente monitorizado en las estaciones de la red GTN-P a nivel internacional, sin embargo, es un parámetro de gran importancia para poder realizar la adecuada interpretación de los datos térmicos y de conocer qué está ocurriendo en el terreno a medida que los suelos se congelan y descongelan, y que la nieve se va acumulando y fundiendo (ej., Hrbacek, et al., 2021). Estos instrumentos se instalan en esta campaña en 3 estaciones de la isla Livingston, y 1 de la isla Decepción pertenecientes a la red PERMATHERMAL, más 1 estación también en isla Decepción, pero de la red PERMANTAR.

Por el otro, en esta campaña se realiza la instalación de 2 instrumentos de construcción artesanal, siguiendo los diseños existentes en la bibliografía (Gruber, 2019), para la medida de los procesos de levantamiento y subsidencia del terreno como consecuencia de los procesos de congelación/descongelación que ocurren en terreno con sedimento y presencia de humedad. Estos dos instrumentos se instalan en las estaciones CALM Crater Lake en la isla Decepción y Limnopol Lake en la isla Livingston.

Los datos de estos instrumentos contribuirán a un mejor entendimiento de los procesos que ocurren en los suelos de la Antártida, además de ayudar en la realización de las modelizaciones térmicas que ya se habían iniciado por parte del grupo de investigación (de Pablo and Jafarov, 2017), en los que se usaban datos de temperatura, pero se carecían de otros tan necesarios como estos. En los siguientes años, la extensión de estos instrumentos a otras estaciones de la red supondrán el primer reto a completar.

La campaña 2022-23

En el citado contexto, la campaña 2022-23 para el mantenimiento de las estaciones PT y CALM de la red PERMATHERMAL ha pretendido (1) completar el proceso de reinstrumentalización de la red con la instalación de algunos de los sensores esenciales de las estaciones que no fueron instalados en la campaña anterior, (2) la instalación de sensores de espesor de nieve en prácticamente todas las estaciones, (3) y la instalación de los nuevos sensores de humedad del suelo, y de levantamiento y hundimiento del terreno. Esto ha sido posible gracias a la financiación del Comité Polar Español a través de la Unidad de Tecnología Marina del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), mediante un contrato para el desarrollo de actividades técnicas y especializadas con la Universidad de Alcalá, de acuerdo con el artículo 83 de la Ley Orgánica de Universidades (Ley 6/2001 de 21/12/2001). En el citado contrato se establecieron que los objetivos de la campaña son los siguientes:

- Volcado de datos de temperatura del aire, el suelo y el terreno de las estaciones PT, tomados en el año 2022.
- Renovación de la instrumentación para la medida del espesor de nieve, en los casos posibles.
- Mantenimiento de los sistemas de soporte y alimentación de energía.
- Mantenimiento de las cámaras fotográficas automáticas.
- Toma de datos in situ sobre espesor de la capa activa y datos adicionales (temperatura y humedad del suelo) en el periodo de descongelación por medios mecánicos manuales, en función de las condiciones existentes.
- Preprocesado de los datos y su preparación para incorporación en las bases de datos internacionales
- Envío de los datos al Centro Nacional de Datos Polares.

Alcanzar estos objetivos ha sido posible gracias a la participación en la Campaña Antártica Española 2022-23 organizada por el Programa Polar Español de la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España, con el auspicio del Comité Polar Español y con la logística organizada por la Unidad de Tecnología Marina del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, con la participación del Ejército de Tierra y Armada Española, así como el Hospital Central de la Defensa Gómez Ulla, del Ministerio de Defensa, Gobierno de España.

Estaciones

Localización

En la actualidad, la red PERMATHERMAL está constituida por 13 estaciones para el control térmico de los suelos (PT) en 10 ubicaciones (Tabla 1) y 2 estaciones para el control del espesor de la capa activa (CALM) (Tabla 2), repartidas por las penínsulas Hurd y Byers de la isla Livingston, y en el entorno de Crater Lake en la isla Decepción (Fig. 2). Además, de éstas, existen otras estaciones en fase de pruebas en isla Decepción (Cerro Caliente y Colina Sísmica, esta última en colaboración con la Universidad de Granada) (Tabla 1), así como estaciones para el estudio de los suelos congelados en el emplazamiento de la BAE Gabriel de Castilla con fines del control de la estabilidad del emplazamiento y el efecto de la infraestructura sobre los suelos congelados (de Pablo et al., 2017).

Tabla 1: Localización de las estaciones PT de la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción, Antártida (modificado de de Pablo, 2021). [*] Estación experimental cuya continuidad e incorporación a la red está pendiente de estudio.

ESTACIONES PT	LOCALIZACIÓN	ALTITUD	OBSERVACIONES
Isla Livingston:			
Península Byers:			
Limnopolare Lake	62°38'59.100"S 61°06'16.900"W	75 m	ZAEP n° 126
Domo	62°37'17.049"S 60°58'32.098"W	45 m	ZAEP n° 126
Península Hurd:			
BAE Juan Carlos I	62°39'48.815"S 60°23'26.484"W	11 m	
Nuevo incinerador	62°39'50.744"S 60°23'09.061"W	19 m	
Incinerador	62°39'52.980"S 60°23'08.079"W	34 m	
Collado Ramos	62°40'03.063"S 60°23'31.504"W	117 m	
Morrena	62°40'01.671"S 60°22'31.430"W	145 m	
Glaciar	62°40'09.339"S 60°22'50.949"W	267 m	
Monte Reina Sofía	62°40'15.657"S 60°22'46.468"W	271 m	
Isla Decepción:			
Crater Lake 1	62°59'07.900"S 60°40'43.000"W	85 m	
Crater Lake 2	62°59'07.400"S 60°40'47.900"W	85 m	
Crater Lake 3	62°59'08.000"S 60°40'48.200"W	84 m	
Crater Lake 4	62°59'09.000"S 60°40'34.700"W	85 m	
Colina sísmica [*]	62°58'40.100"S 60°40'44.000"W	28 m	
Cerro Caliente [*]	62°58'27.200"S 60°42'38.700"W	107 m	ZAEP n° 140

Campaña Antártica 2022-23

Tabla 2: Localización de las estaciones CALM en las islas Livingston y Decepción, Antártida (modificado de de Pablo, 2021).

ESTACIONES CALM	LOCALIZACIÓN	ALTITUD	OBSERVACIONES
Isla Livingston: Península Byers: Limnopolar Lake	62°38'59.100"S 61°06'16.900"W	75 m	ZAEP n° 126
Isla Decepción: Crater Lake	62°59'06.845"S 60°40'45.225"W	85 m	

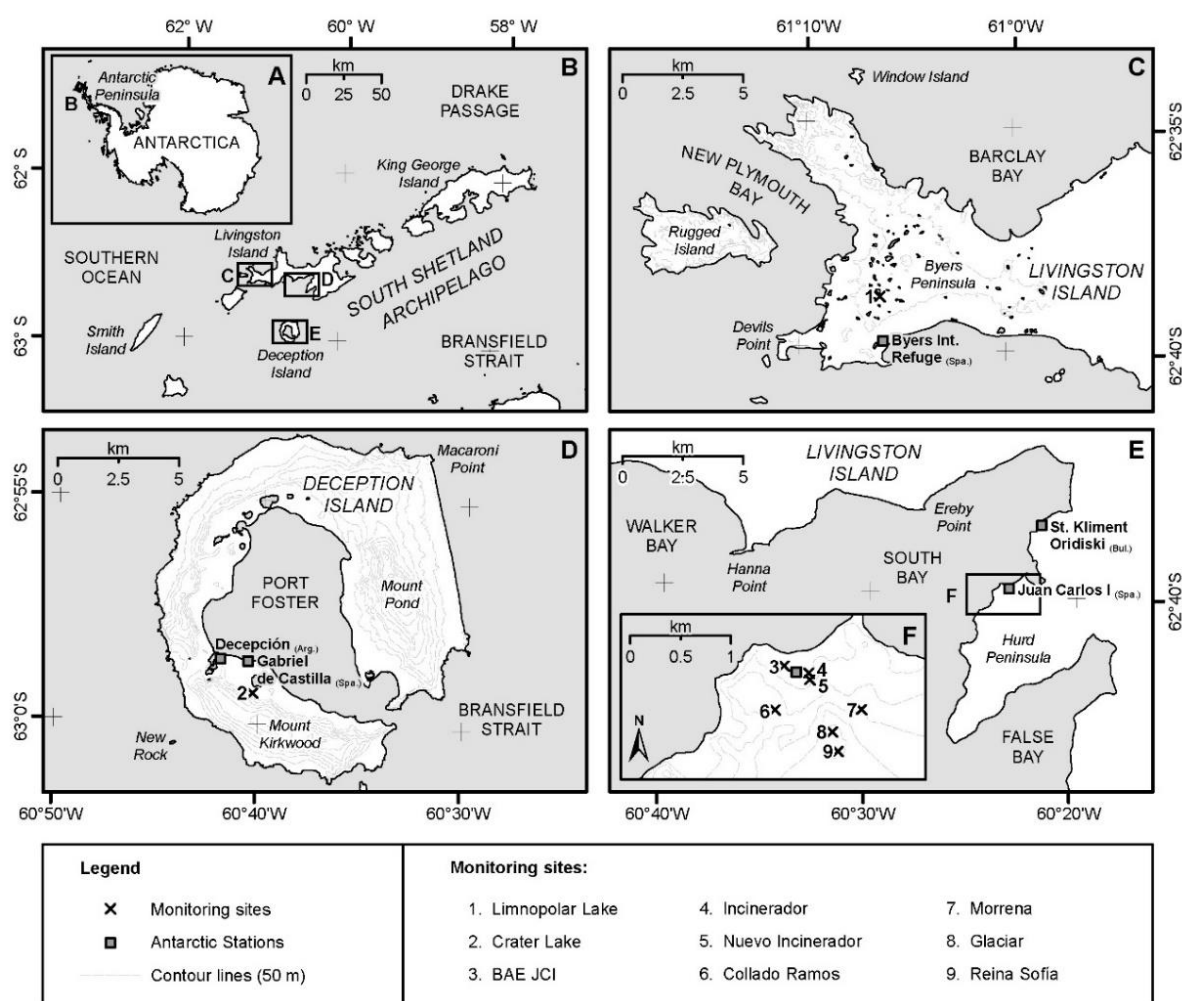


Figura 2: Mapa de localización de los emplazamientos de monitorización del estado térmico del permafrost y el espesor de la capa activa que constituyen la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción, Antártida (Tomado de de Pablo et al., 2016).

Todos estos emplazamientos (Fig. 3) se ubican en zonas venteadas para evitar, en la medida de lo posible, la sobreacumulación de nieve con el consiguiente efecto aislante. Además, se ubican en distintas ubicaciones de acuerdo con distintos objetivos: las estaciones situadas en la península Hurd permiten realizar un estudio altitudinal, desde el nivel del mar hasta la cima del

PERMATHERMAL

monte Reina Sofía (474 msnm); las estaciones situadas en la península Byers, un estudio de la variabilidad con la distancia al frente del glaciar; y las estaciones en isla Decepción, un estudio del efecto sitio en un emplazamiento con similares características litológicas, además de la comparativa con los emplazamientos de isla Livingston.

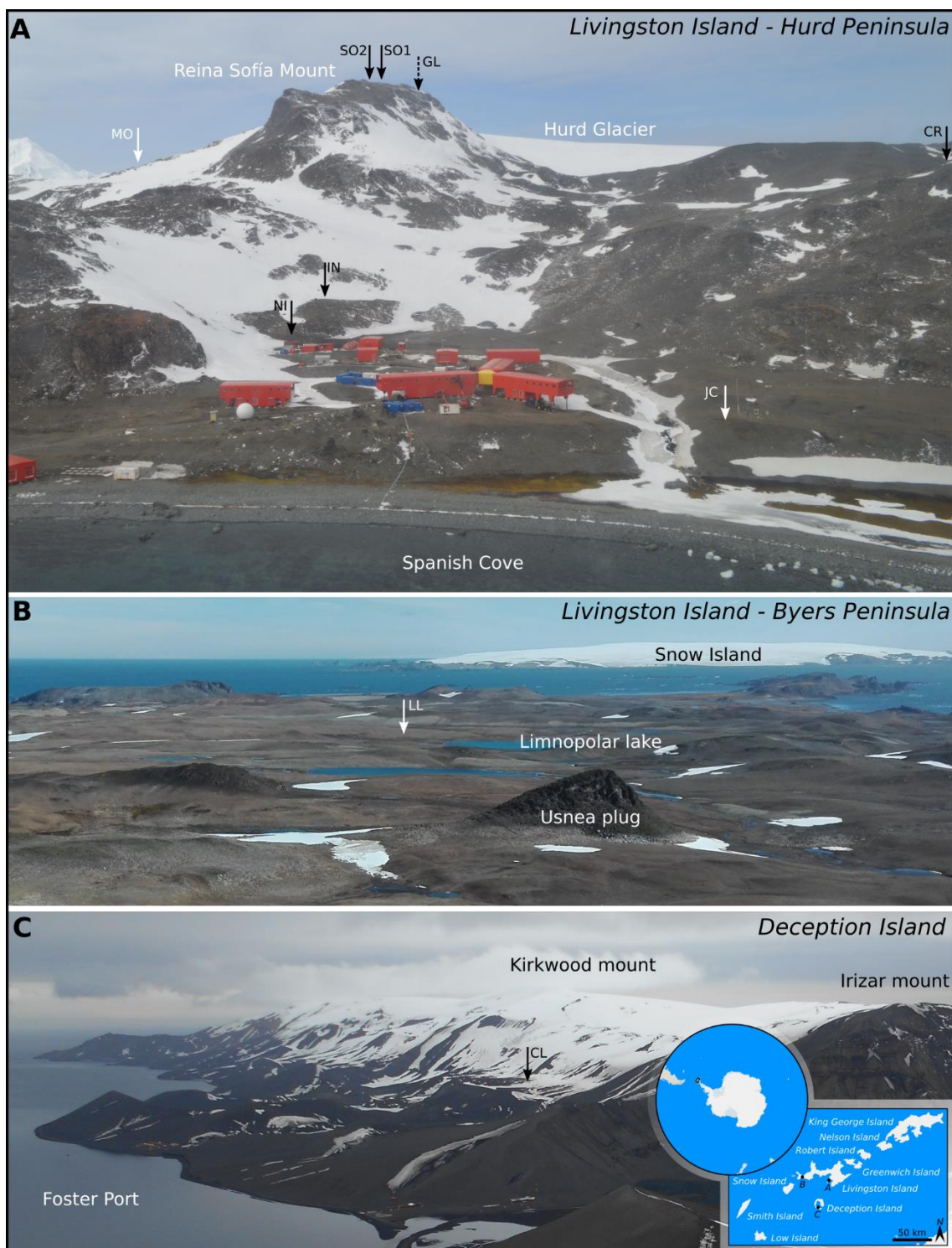


Figura 3: Localización de los emplazamientos de monitorización del estado térmico del permafrost y el espesor de la capa activa que constituyen la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción, Antártida (Tomado de de Pablo et al., 2023).

Parámetros

Cada una de estas estaciones PT cuenta con instrumentos para la medida de la temperatura de terreno y de parámetros ambientales, mientras que las estaciones CALM tienen instrumentos complementarios que ayudan a la interpretación de los datos térmicos y de espesor de la capa activa. Aunque no todas las estaciones disponen de los mismos instrumentos (Tabla 3) debido al interés científico y/o complejidad logística, en las últimas dos campañas se han estandarizado y reinstrumentalizado las estaciones con el fin de mejorar la calidad de la red de datos, a la vez que facilitar la comparativa entre estaciones de medida en este entorno.

En general, las estaciones PT (Fig. 4) cuentan con [A] un sondeo para la medición de la temperatura del terreno a distintas profundidades, para realizar un seguimiento del régimen térmico de la capa activa o del permafrost, cuando este es interceptado por la perforación; [B] una placa metálica enterrada a unos 2 cm de profundidad con un sensor para la medida de la temperatura de la superficie, necesaria, no solo como referencia para los datos de la temperatura del terreno, sino también para el estudio de la presencia y/o espesor de la cubierta nival y del régimen de temperaturas del aire y del suelo; [C] un mástil con un sensor para registrar la temperatura del aire, con [D] un mástil horizontal con el sensor de espesor de nieve instalado en la presente campaña, y que sustituirá a partir de la siguiente al [E] mástil de madera con sensores de temperatura del aire a distinta altura sobre el terreno (termonivómetro) utilizados para aproximar el espesor de nieve.

Las estaciones CALM (Tabla 3), por su parte, pueden tener una serie de instrumentos adicionales como son la medida de la temperatura del aire, el espesor de la cubierta de nieve o la medida de la temperatura de la superficie de forma distribuida con el fin de facilitar datos que permitan la interpretación de la variabilidad espacial y temporal del espesor de la capa activa, que es el parámetro medida en las mallas CALM. Otros instrumentos, no establecidos en los protocolos PT ni CALM, han sido añadidos en algunos emplazamientos para mejorar a variedad de datos disponibles que ayuden a la interpretación de los datos fundamentales de la red, como pueden ser cámaras fenomenológicas, una estación nivométrica o sensores para la medida de los movimientos verticales debido a los procesos de congelación/descongelación (Tabla 3).

PERMATHERMAL

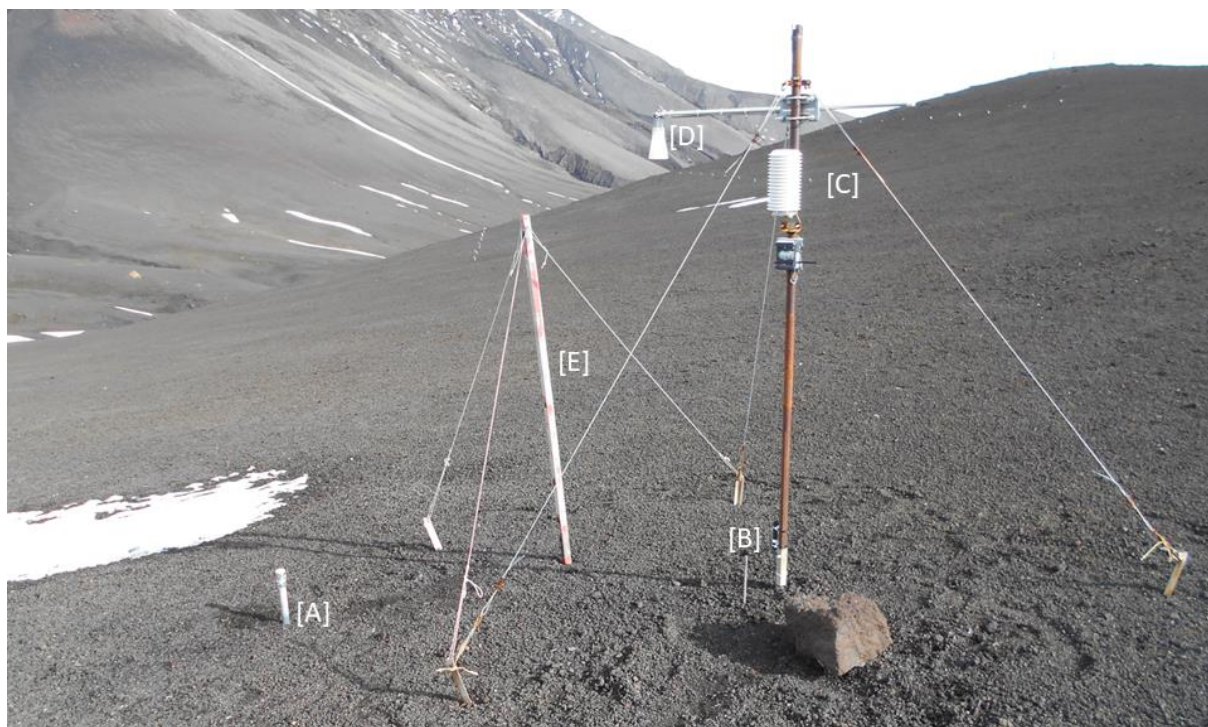


Figura 4: Ejemplo de una estación PT de la red PERMATHERMAL con la instrumentación usual que incluye dispositivos para la medida de la temperatura de los suelos congelados a distinta profundidad [A], de la superficie [B], y del aire [C], además de espesor de la cubierta de nieve [D], este último instalado en la campaña 2022-23, y que sustituirá a los termonivómetros [E] utilizados hasta la actualidad para la aproximación del espesor de la capa de nieve.

Tabla 3: Estaciones de monitorización de la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción de la Antártida, e instrumentos instalados en cada una de ellas desde el año 2005 para las redes internacionales PT y CALM-S, dentro de la red global GTN-P. AT: Temperatura del aire.; ST: Temperatura de la nieve; GST: Temperatura de la superficie; GT: Temperatura del terreno.; TTOP: Temperatura del techo del permafrost; TLC: Cámara time-lapse; SPA: Estación nivométrica; [X]: preexistentes; [□] instalado en la campaña 2022-23; [o] temporalmente inoperativo (Modificado de de Pablo et al., 2020 y de Pablo, 2021).

LUGAR	ZONA	ESTACIÓN	CÓDIGO	TIPO	INSTRUMENTACIÓN						
					AIR	SNO	SUR	BOR	TOP	CAM	SPA
Isla Deception	Crater Lake	Crater Lake	A16	CALM-S	X	o	o		X	X	X
			CL-1	PT	X	X	X	X			
			CL-2	PT	X	X	X	X			
			CL-3	PT	X	X	X	X			
			CL-4	PT		□	X	X			
			CL-33	PT		X	X	X			
			CL-77	PT		X	X	X			
Isla Livingston	Península Byers	Limnopolar Lake	A25	CALM-S		X	X				X
			LL-S1	PT	X	X	X	X			
			LL-S2	PT				X			
	Península Hurd	Domo	DO	PT	X		X	X			
		BAE-Juan Carlos I	JC	PT	X	X	X				
		Nuevo incinerador	NI	PT	X	X	X	X			
		Incinerador	IN	PT	X	X	X	X			
		Collado Ramos	CR	PT	X	X	X	X			
		Morrena	MO	PT	X	X	X				
		Glaciar	GL	PT	X	□	X	X			
		Sofia	SO-1	PT	X	X	X	X			
	SO-2						X				

Mediciones

Durante la visita a las zonas de estudio que tienen lugar durante las campañas antárticas se realizan además mediciones *in situ* de distintos parámetros, siendo el más importante la medida del espesor de la capa activa en las mallas CALM. Adicionalmente, se toman otra serie de medidas, que varían de unos años a otros, y que van dirigidas a la toma de datos puntuales o distribuidos para conocer otros parámetros que permitan entender e interpretar, tanto las medidas realizadas de espesor de la capa activa, como de temperaturas de la superficie o del terreno o el espesor de la cubierta nival.

Estas medidas, que van desde la temperatura o humedad superficial, a la toma de fotografías infrarrojas, se realizan de forma complementaria a las medidas sistemáticas, mediante el empleo de otros tipos de sensores e instrumentos.

Mantenimiento

El mantenimiento de las estaciones PT y CALM requieren de visitas anuales a las mismas y la realización de tareas que permitan, por un lado, la recuperación de los datos registrados por los sensores en los distintos instrumentos de cada una de las estaciones y por el otro la adecuación de las instalaciones que se hayan podido ver dañadas durante el invierno por las duras condiciones ambientales.

Tras esta campaña 2022-23, las primeras han quedado reducidas de forma muy importante debido a la renovación de la instrumentación de las estaciones, quedando únicamente algunos dispositivos que aún requieren una mayor cantidad de tareas de volcado de datos, borrado de memoria, reprogramación, etc., y que serán sustituidos de forma definitiva en las próximas campañas.

Por otro lado, las duras condiciones ambientales en la zona de estudio de la Antártida también requieren hacer tareas dirigidas a, (1) sustituir los instrumentos que hayan podido verse dañados en el año anterior a la visita, (2) a reparar los daños sufridos tanto en los instrumentos como en las instalaciones de soporte, como a (3) asegurar la integridad de los instrumentos durante el periodo que pasarán abandonadas trabajando de forma autónoma durante los siguientes meses hasta la próxima visita.

Datos

Originalmente, los datos registrados por los instrumentos de las distintas estaciones PT y CALM son, en general, almacenados en ficheros de texto plano en formato ASCII, cuyo nombre está codificado con la siguiente estructura:

Localización_Sitio_instrumentación_identificador_Altura/profundidad_año.extensión
XXX_XX_XXX_XXXXX_XXXXcm_XXXX.XXX

donde cada elemento de la estructura tiene unos códigos preestablecidos que se vienen utilizando desde el año 2010:

Localización:	
LIV	Isla Livingston
DEC	Isla Decepción
Sitio:	
JC	BAE Juan Carlos I
NI	Nuevo Incinerador
IN	Incinerador
CR	Collado Ramos
MO	Morrena (anteriormente Motos)
GL	Glaciar
SO	Sofía
LL	Limnopolar Lake
DO	Domo
CL	Crater Lake
GC	BAE Gabriel de Castilla
Instrumentación:	
AIR	Temperatura del Aire
SNO	Temperatura de la nieve
SUR	Temperatura de la superficie
BOR	Temperatura del terreno
SPA	Estación nivométrica multiparamétrica
TOP	Temperatura del techo del permafrost
CAM	Fotografías fenomenológicas
ALT	Espesor de capa activa
Identificador:	
SXXXX	Sitio XXXX numerados por número de experiencia del mismo tipo en dicho punto
NXXYY	Nodo de coordenadas relativas (XX,YY) en los sitios CALM
Altura/Profundidad:	
XXXXcm	Altura o profundidad en cm y cuatro dígitos
Año:	
XXXX	Año de los datos recogidos, con cuatro cifras
Extensión:	
txt	datos brutos
csv	metadatos y datos procesados
jpg	imágenes
XXX	Otros formatos específicos de cada instrumento

Debido a la renovación de los instrumentos, los nuevos dispositivos empleados, cuando hay varios sensores en el mismo experimentos, éstos permiten tener todos los datos apilados en el mismo fichero, por lo que se está trabajando en el cambio de nomenclatura de los datos, que ahora tendrían una estructura parecida, de la siguiente forma:

<p><i>Localización_Sitio_instrumentación_identificador_año.extensión</i> <i>XXX_XX_XX_XXXXX_XXXX.XXX</i></p>
--

en el que se ha eliminado la referencia a la altura/profundidad, ya que no habrá distintos ficheros de datos para un mismo experimento, y todos los datos, de los sensores situados a distintas alturas o profundidades, quedarán reflejados en el interior del fichero. En todo caso, con este sistema de nomenclatura es posible mantener en todo momento la trazabilidad de los datos y conocer el contenido exacto de cada fichero, así como la ubicación del sensor e instrumento que lo tomó, y el periodo anual en el que lo hizo.

Estos datos brutos son almacenados en el servidor de datos de la red PERMATHERMAL y enviados al Centro Nacional de Datos Polares. Los datos pasan posteriormente por distintos niveles de preprocesado dirigido a dejarlos listos para su explotación. Estos niveles de preprocesado son:

- Nivel 0: Datos brutos, tal y como son recuperados de los sensores e instrumentos.
- Nivel 1: Datos formateados, ajuste de formato a estructura de datos concreta.
- Nivel 2: Datos agregados, unión en un solo fichero de los datos registrados por distintos sensores para una misma medición
- Nivel 3: Datos limpios, eliminación de datos erróneos y espurios
- Nivel 4: Datos corregidos, con ajustes de offset, correcciones de deriva, etc.
- Nivel 5: Datos agrupados, en el que se unen los datos de distintos años

No todos los datos requieren de todos los niveles de ajuste, por lo que pueden ser exactamente iguales los de un nivel y otro, pero todos pasan el escalonado de preprocesado, asegurando de esta forma la calidad de los datos que se divulgarán y explotarán.

Los datos finales son los enviados a la base de datos de GTN-P y CALM.

Instrumentación

Estaciones PT

Las estaciones PT están, generalmente, dotadas de instrumentos que permiten la medida de temperatura del aire, temperatura de la superficie, y temperatura del suelo a distintas profundidades, así como de espesor de nieve. Hasta la campaña 2022-23, este espesor se obtenía de forma indirecta a través de la medida de la temperatura del aire a distintas alturas con sensores montados sobre un mástil de madera, denominados termonivómetros.

No todas las estaciones están dotadas de todos estos instrumentos, en función de las complejidades técnicas del lugar y condicionantes logísticas. En otros casos, algunas contaban con medios técnicos más avanzados, existiendo, en la actualidad una homogeneidad en las estaciones, salvo en las dos excepciones existentes debido a cuestiones logísticas. Esta homogeneidad se ha conseguido a lo largo de los años de estandarización de la red y de la renovación de los instrumentos llevados a cabo en las campañas 2021-22 y 2022-23.

Dispositivos de medida

La renovación de la red ha implicado la sustitución de distintos tipos de sensores y dispositivos, desarrollados por distintas empresas, por un mismo tipo de dispositivo, desarrollado por *Geoprecision GmbH*, con distintos tipos y número de sensores adosados que le permiten adquirir datos con una frecuencia horaria durante 1 a más de 15 años, según la configuración, y con una fuente de alimentación simple (una pila de litio) que igualmente puede durar múltiples años. Estos dispositivos, del modelo M-Log5W (Tabla 4), disponen de tecnología inalámbrica de comunicación vía radio 433 MHz, que permite el volcado de datos de forma remota con un software específico (FG2) para sistema operativo Windows desarrollado por la propia empresa.

Estos dispositivos han sido conectados a distintos tipos de sensores que permiten la toma de datos de temperatura del aire, del suelo, o del terreno a distinta profundidad, así como de espesor de nieve y de medida de la inclinación del terreno para establecer procesos de levantamiento y subsidencia del suelo (Tabla 4). Con ellos se sustituyen a los distintos dispositivos y sensores empleados hasta la presente campaña.

Tabla 4: Características de los instrumentos y sensores empleados en la red PERMATHERMAL, tanto en las primeras décadas de funcionamiento de las mismas (iButton y Tinytag), como desde la campaña 2021-22 tras la reinstrumentalización de la misma (M-Log5W). AT: Temperatura del aire.; ST: Temperatura de la nieve; GST: Temperatura de la superficie; GT: Temperatura del terreno.; TTOP: Temperatura del techo del permafrost

Marca	Dispositivo	Modelo	Sensor	Resolución	Precisión	Medidas
Maxim	iButton	DS1922L	Digital	0,0625 °C	±0,5 °C	ST, GST, GT, TTOP
Gemini	Tinytag	Plus 2	PT100	0,01 °C	±0,04 °C	AT
Geoprecision	M-log5W	Cable	PT1000	0,01 °C	±0,1 °C	AT, GST, TTOP
Geoprecision	M-log5W	String	TNode	0,01 °C	±0,1 °C	GT
Geoprecision	M-log5W	String	TNodeEx	0,001 °C	±0,1 °C	GT
Geoprecision	M-Log5W	SnowBox	Maxbotic	1 mm	±1%	SNO
Geoprecision	M-Log5W	Tilt		0.005 °	0.1 °	GSH

Temperatura del aire

Para la medida de la temperatura del aire se venían utilizando dispositivos de registro de datos dotados de una sonda externa tipo *PT100*, instalada dentro de un protector de radiación solar, para evitar el calentamiento directo del sensor por parte del sol, ni su enfriamiento por la adhesión de hielo durante el invierno. Estos dispositivos se encontraban instalados a 160 cm de altura sobre el suelo en un mástil, generalmente metálico y fijado al terreno mediante vientos de cuerda o acero, en función de las circunstancias.

Los sensores instalados eran de tipo *TinyTag Plus 2* de *Gemini*, cuya resolución de medida de la temperatura es de 0,01°C y una precisión de 0,04°C. Tomaban datos con una frecuencia horaria. Estos datos son generalmente volcados una vez en cada campaña antártica, reemplazándose el dispositivo completo o bien reponiéndose la pila, si bien, por la duración de la pila y por la memoria disponible, podrían registrar datos durante al menos 2 años.

Durante la campaña 2021-22 han sido sustituidos por registradores inalámbricos (433 MHz) *Geoprecision* modelo M-Log5W-Cable, dotados de un sensor PT1000 que le confiere una resolución de 0,01°C y una precisión de ±0,1°C a las más de 400.000 medidas capaces de ser almacenadas en su memoria de 2.048 Kb, alimentados con una batería AA de Litio de 3.6V por más de 10 años.

Temperatura de la superficie

A unos 2 cm de profundidad, y cubierto con material del suelo para evitar el calentamiento directo del sensor, se sitúa un dispositivo de toma de datos de temperatura, adosado a una placa de acero de 20x20x0,2 cm. El objetivo de esta placa metálica de alta conductividad térmica es permitir al sensor registrar temperaturas más homogéneas que las que podría medir en un único punto.

Hasta la campaña 2021-22, el dispositivo de medida era generalmente un registrador de datos *iButton Thermochron* modelo *DS1922L* de *Maxim*, cuya resolución es de 0,0625°C, si bien su precisión es de 0,5°C. Estos dispositivos, si bien aguantan una cierta exposición a las condiciones ambientales, no son estancos, por lo que se encontraban dentro de una cápsula modelo *DS9107+* del mismo fabricante, que es la que estaba adosada a la placa metálica antes mencionada. Estos dispositivos en miniatura, desechables, incorporan el sensor de temperatura, el registrador de datos y la batería, por lo que tienen una vida útil estimada de unos 5 años. La memoria, también limitada, permite registrar 4.096 medidas, por lo que estaban programados para la toma de datos cada 3 horas, con el fin de asegurar que registran datos durante al menos un año.

Durante la campaña 2021-22 también han sido sustituidos por los mismos registradores inalámbricos (433 MHz) *Geoprecision* modelo *M-Log5W-Cable*, dotados de un sensor *PT1000* que le confiere una resolución de 0,01°C y una precisión de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ a las más de 400.000 medidas capaces de ser almacenadas en su memoria de 2.048 Kb, alimentados con una batería AA de Litio de 3.6V por más de 10 años. El sensor se ha acoplado a una placa de acero de 20x20x0,2cm.

Temperatura del terreno

Para la medida de temperatura del terreno se instalan sensores de temperatura en el interior de un tubo de PVC sellado en ambos extremos e introducido en el terreno en perforaciones previas realizadas para tal fin. No todas las estaciones cuentan con estas perforaciones (Tabla 3), y, en las que existen, la profundidad total es diferente, desde los 80 cm hasta los 25 m, predominando las perforaciones someras, de menos de 2 m de profundidad. Hasta la campaña 2021-22 se trataba, generalmente, de registradores de datos *iButton Thermochron* modelo *DS1922L* de *Maxim*, cuya resolución es de 0,0625°C y precisión de 0,5°C, como en otros experimentos de la red, que toman datos con una frecuencia de 3 horas. En algunas ocasiones estos instrumentos

se encontraban automatizados y los sensores eran sustituidos por una sonda termométrica con sensores digitales *DS18S20* de *Maxim* con similares características de resolución y precisión, o por sonda de termopares. En ambos casos, las sondas estaban conectadas a un registrador de datos de tipo *CR1000* de *Campbell Scientific*, que registra datos cada hora en su memoria interna, gracias a la alimentación mediante una batería recargada por un panel solar durante todo el año.

En la presente campaña se ha completado la sustitución de todos los sensores y cadenas termométricas por los nuevos dispositivos. La única excepción es la de la estación Glaciar en la isla Livingston, por encontrarse aún bajo el hielo. Esta estación mantiene su cadena termométrica y el registrador de datos CR1000. En el resto de las estaciones se han instalado registradores inalámbricos (433 MHz) *Geoprecision* modelo M-Log5W-String, dotados de cadenas de sensores, bien modelo TNode (resolución 0,01°C y precisión $\pm 0,1^\circ\text{C}$) o TNodeEx (resolución 0,001°C y precisión $\pm 0,1^\circ\text{C}$), con los que tomar hasta 500.000 medidas que es la capacidad de su memoria de 2.048 Kb, alimentados con una batería AA de Litio de 1.5V por más de 5 años.

Estas cadenas termométricas son de fabricación específica, y los sensores se encuentran situados a profundidades estandarizadas según el protocolo GTN-P (Harris et al., 2001; Streletskiy et al., 2022), de 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 160, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 800, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, y 2500 cm, según la profundidad de cada sondeo. En algunas ocasiones se han instalado algún sensor a profundidades fuera de este estándar, para alcanzar la profundidad máxima del sondeo.

Espesor de nieve

El espesor de nieve no se medía directamente, sino que se calculaba a partir de los datos de temperatura del aire registrados a distintas alturas, aplicando algunos de los distintos métodos existentes para tal fin (ej., Lundquist and Lott, 2008; Lewkowicz, 2008). Para ello se instalan sensores de temperatura a distintas alturas en un mástil de madera (por tener baja conductividad térmica). Estos sensores en miniatura se sujetan con los soportes plásticos *DS9093DR+* anteriormente descritos, y se introducen en unas perforaciones de 1 cm de profundidad realizadas en el mástil a las alturas de medición. El soporte plástico se atornilla a la madera, asegurando en sensor en el interior de la

perforación, a la vez que permitiendo su contacto con las condiciones atmosféricas. El sensor, que está expuesto, puede verse afectado por procesos de congelación lo que ocasionalmente produce su deterioro con la consiguiente pérdida de datos.

Inicialmente, los sensores utilizados eran de tipo *iButton ThermoChron* modelo DS1921G, cuya menor resolución, precisión y memoria solo admitían medidas cada 4 horas para poder cubrir un periodo de un año. Desde 2010, todos los termónivómetros están dotados de los sensores modelo *DS1922L* y registran temperaturas cada 3 horas. Las alturas de medida de la temperatura del aire son 2,5, 5, 10, 20, 40, 80 y 160 cm sobre la superficie, de tal manera que las variaciones de espesor que se pueden determinar son cada vez menos precisas a medida que aumenta el espesor de la nieve. Esto no es un problema ya que el objetivo es determinar la llegada y desaparición de la nieve, y además el espesor crítico que condiciona el comportamiento térmico de los suelos que ronda los 40 cm.

Durante la campaña 2022-23 se ha procedido a sustituirlos por dispositivos M-Log5W con sensores de ultrasonidos Maxbotic MB7574, capaces de tomar medidas de distancia al suelo de entre 500 y 5000 mm, alimentados con una pila D de litio de 3.6V, que le alimenta por un periodo aproximado de 3 años, tomando datos de forma horaria. Para evitar el efecto del hielo que se pueda formar en la membrana del dispositivo, están configurados para realizar vibraciones antes de la toma de datos, de tal forma que se rompan los posibles cristales de hielo y que las medidas que tomen sean correctas. Si bien este dispositivo no mide espesor, sino distancia al suelo, el cálculo del espesor es sencillo a partir de la diferencia con la máxima distancia media al suelo. La ventaja principal es que se aumenta de forma importante, tanto la resolución temporal y la resolución en espesor de nieve que se puede obtener con estos dispositivos.

Para su instalación se han adosado los sensores, en forma de cono, al extremo de un tubo de aluminio de 1 m de longitud, que, a su vez, se ha sujetado con abrazaderas metálicas a los mástiles en los que se encuentran instalados los sensores de temperatura del aire (Fig. 4). El objetivo de este diseño es reducir, cuando sean retirados de forma definitiva los termónivómetros, el número de mástiles instalados en cada una de las estaciones, haciendo además que el impacto visual y el mantenimiento sea más sencillo en los siguientes años.

Estaciones termométricas automáticas

En algunos puntos las estaciones PT estaban dotadas de instrumentación más compleja que sustituye a parte de los instrumentos anteriormente descrito. Estas estaciones, alimentadas con una batería que era recargada con un panel solar montado sobre un poste, disponían de un sistema de adquisición de datos modelo *CR1000* de *Campbell Scientific*, al que están conectada una sonda termométrica dotada de sensores de temperatura a distinta profundidad. Estas sondas se encontraban en el interior de los sondeos perforados y que atraviesan la capa activa y se introducen en el permafrost.

En algunos casos, adicionalmente se les había conectado un sensor de temperatura y humedad ambiental HMP45 de *Vaisala*, montado sobre el mismo mástil en el que se encuentra el panel solar, así como la caja con la batería y el sistema de adquisición de datos. Alguna estación también disponía de sensores para la medida de la temperatura superficial con un sensor tipo *PT100* adosado a una placa de acero de características como las descritas anteriormente, así como para la medida de la humedad del suelo con un dispositivo *CS615* de *Campbell Scientific*. Estas estaciones automáticas tomaban datos de forma horaria almacenando los datos, tanto en su memoria interna, como en una tarjeta Compaq flash de 512 Mb conectada al registrador de datos.

En la campaña 2021-22 se procedió al desmantelamiento de 2 de las 3 estaciones que estaban dotadas de este tipo de electrónica, estaciones Sofía y Crater Lake 3. En la campaña 2022-23 se pretendía realizar el desmantelamiento de la tercera estación, Glaciar, si bien no ha sido posible ya que aún hay aproximadamente 1 m de hielo cubriendo la boca del sondeo. Como la sustitución de la sonda termométrica por un dispositivo *Geoprecision* M-Log5W-String requiere abrir la boca del sondeo, no se ha realizado dicha sustitución ya que tras los primeros intentos se ha comprobado que se corría el riesgo de inundar el sondeo, lo que habría supuesto la pérdida del mismo. Por ello, y considerando la tendencia de la cubierta de nieve de los últimos años, se mantiene la instrumentación almacenada en la BAE Juan Carlos I con el fin de que pueda ser sustituida en la siguiente campaña antártica.

Estaciones CALM

Las estaciones CALM han sido establecidas en la zona de estudio entre los años 2005 y 2009, siguiendo los protocolos que establece la propia red, optando por redes de 100x100m que permiten el conocimiento puntual del estado de la capa activa, frente a otras configuraciones que permiten estudiar la variabilidad regional. El protocolo permite estudiar el espesor de la capa activa, tanto mediante sondeos mecánicos manuales, como mediante la medida de la temperatura del terreno, optándose en nuestras estaciones por el primer método.

En el caso de las estaciones CALM de la red PERMATHERMAL, se han incorporado otros experimentos que permiten un conocimiento más profundo de los factores que influyen en los espesores de la capa activa medidos anualmente.

Espesor de la capa activa

La medida del espesor de la capa activa se realiza de acuerdo con los protocolos establecidos por la propia red CALM. Para ello se han establecido las mallas de control de 100x100m, balizadas en su perímetro cada 10 metros con estacas de madera y/o metal corrugado clavados en el terreno.

La toma de datos del espesor de la capa activa se realiza una vez cada verano austral, durante el periodo de descongelación del suelo, mediante la introducción en el terreno de una sonda manual consistente en una barra de acero de 1 m de longitud y 1 cm de diámetro, terminada en punta y con un mango de sujeción. Esta sonda se introduce en repetidas ocasiones en cada uno de los 121 nodos de cada malla CALM, estableciéndose como espesor de la capa activa, la longitud de la barra que ha entrado en el terreno hasta tocar el techo del permafrost.

Es necesario considerar que cuando se realiza la visita a la malla CALM, fijada por el calendario logístico de la campaña, no siempre coincide con el máximo espesor de la capa activa, por lo que en muchas ocasiones nos referiremos a las medidas realizadas como profundidad descongelada y no como espesor de capa activa (Guglielmin, 2006).

Como la malla está marcada solo en el perímetro, para determinar la posición de los demás nodos, para la toma de medidas se extiende una cuerda,

previamente marcada cada 10 m, sujetándose en las estacas de lados opuestos de la malla y cruzando la misma. Tras completarse las medidas en los 11 nodos que cubre, dicha cuerda se va desplazando a los siguientes pares enfrentados de estacas, hasta completar la medición en la totalidad de la malla.

Temperatura del techo del permafrost

La medida de la temperatura del techo del permafrost a lo largo del año también se realizaba mediante sensores de temperatura en miniatura tipo *iButton Thermochron DS1922L* anteriormente descritos, registrando datos cada 3 horas en el fondo de un tubo de PVC sellado en ambos extremos e introducido en el terreno en perforaciones cortas realizadas para tal fin.

Estas medidas se realizan únicamente en el CALM de Crater Lake, encontrándose 16 de estos dispositivos repartidos de forma regular cada 20 metros en los nodos interiores de la citada malla.

Durante la campaña 2021-22 también se sustituyeron por los mismos registradores inalámbricos (433 MHz) *Geoprecision* modelo M-Log5W-Cable instalados para medir la temperatura del aire y de la superficie, dotados de un sensor PT1000 que le confiere una resolución de 0,01°C y una precisión de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ a las más de 400.000 medidas capaces de ser almacenadas en su memoria de 2.048 Kb, alimentados con una batería AA de Litio de 3.6V por más de 10 años.

Temperatura superficial

Con el objetivo de estudiar la evolución de la temperatura superficial, y la determinación de la presencia de nieve en las mallas CALM, se han instalado 36 sensores de temperatura repartidos de forma regular por los nodos pares de la red. Los sensores de temperatura utilizados son similares a los utilizados en los demás experimentos de la red: sensores tipo *iButton Thermochron DS1922L* que registran la temperatura cada 3 horas. Estos dispositivos se encuentran en el interior de una cápsula de plástica estanca, enterradas a unos 2-3 cm de profundidad con el fin de evitar el calentamiento por radiación solar.

La sustitución de estos sensores por dispositivos *Geoprecision* modelo M-Log5W-Cable es el objetivo de las siguientes campañas, de tal manera que toda la instrumentación, principal y adicional, esté basada en el mismo tipo de tecnología.

Espesor de cubierta nival

Aunque con los datos de temperatura superficial es posible determinar la presencia o no de una cubierta nival sobre el terreno, no es posible establecer su espesor. Para conocer cómo este varía entre los distintos puntos de las mallas CALM, en 2017 se instalaron 3 termonivómetros en los extremos y centro de una de las diagonales de cada malla CALM. Estos termonivómetros, similares a los previamente descritos, se caracterizan por disponer de un mayor número de sensores, con el fin de permitir derivar espesores de cubierta nival con una mayor resolución.

Por ello, en lugar de los 7 sensores normalmente instalados en los termonivómetros de las estaciones PT, en éstos se contaba con 15 sensores de temperatura miniaturizados tipo *iButton Thermochron DS1922L* registrando datos cada 3 horas (en lugar de los 7 usados en los termonivómetros de las estaciones PT). Los sensores estaban situados a 2,5, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140 y 160 cm sobre la superficie, acoplados a un soporte plástico *DS9093DR+* anteriormente descrito, y atornillado a un mástil de madera en el que se perforaron unas cavidades que permitían proteger los dispositivos de las inclemencias ambientales, pero seguir en contacto con la atmósfera para registrar su temperatura.

Este tipo de experiencia está temporalmente deshabilitada desde enero de 2022, ya que no se disponía de fondos suficientes para hacer frente a la compra de los sensores necesarios para este experimento, pero además se estaba valorando la opción de emplear otro tipo de tecnología. Por ello, en futuras campañas se valora la instalación de dispositivos *Geoprecision* modelo M-Log5W-SnowBox, como los instalados para la toma de datos de espesor de nieve en las estaciones CALM durante la campaña 2022-23.

Otros instrumentos

Con el fin de facilitar la interpretación de los datos de temperatura del aire, el suelo y el terreno, objetivo principal de la instrumentación de las estaciones PT, en el contexto local, se han instalado una serie de instrumentos adicionales que toman datos de diverso tipo. Aunque estos instrumentos no están considerados en los protocolos PT o CALM, son de gran interés para el entendimiento de la variabilidad de los procesos ambientales que ocurren en la superficie y que condicionan la evolución térmica de los suelos temporal o permanentemente congelados.

Cámaras fenomenológicas

Con el fin de poder visualizar y estudiar la evolución de la cubierta nival sobre las zonas de monitorización del espesor de la capa activa, en el año 2008 se realizó la instalación de cámaras fotográficas digitales automáticas alimentadas mediante una batería de 12V cargada con un panel solar de 30W. Estas cámaras, modelo *CC640* de *Campbell Scientific*, fueron configuradas para tomar fotografías en color a la máxima resolución permitida de 640x480 píxeles (0,3MPíxeles). Las cámaras fueron programadas para la toma de 3 fotografías consecutivas a las 11, 12 y 13 horas GMT, con el fin de asegurar la toma de imágenes en las horas de máxima luminosidad, algo especialmente importante durante el invierno antártico. Las imágenes son grabadas en tarjetas Compaq flash utilizando el zócalo incorporado en la propia cámara.

Dichas cámaras fueron instaladas para cubrir el área ocupada por las estaciones CALM con el fin de poder observar el estado de la cubierta nival a lo largo del año, complementando así los experimentos de medida de la temperatura superficial y de espesor de la capa de nieve. Además, permitían observar los fenómenos meteorológicos y la evolución de las condiciones ambientales locales que pueden servir para la interpretación de los datos registrados en todos los demás experimentos.

Dada la baja resolución de las imágenes tomadas por estas cámaras, en el año 2017 se procedió a instalar otras más modernas, modelo *CC5MPX* también de *Campbell Scientific*, que toman imágenes de mayor resolución: 2592x1984 píxeles (5MPíxeles). Estas imágenes son almacenadas en una tarjeta de memoria interna SD de 2 Gb, que puede ser accesible mediante conexión FTP, sin

necesidad de la apertura de la cámara. Estas cámaras han sido programadas también para la toma de datos a las 11, 12 y 13h GMT, y son igualmente alimentadas con baterías de 12V cargadas con un panel solar de 30W instalado sobre el mismo mástil sobre el que se encuentra anclada la cámara y la caja estanca que contiene la batería y el regulador de carga.

Mientras que en el año 2008 se instaló una única cámara por cada sitio CALM, en el año 2017 se instalaron 2. Una de ellas en la misma ubicación que la ya existente, con el fin de proceder a su retirada en campañas futuras, y otra en un nuevo emplazamiento. La idea es que entre ambas se cubriera, no solo el área de la malla CALM, sino también su entorno próximo, desde una ubicación radicalmente diferente, de forma que el fallo de una de las cámaras aún permitiera tener imágenes de la zona de estudio.

En las campañas 2021-22 y 2022-23 se ha procedido a la retirada definitiva de los modelos antiguos, CC640, situados en el CALM de Crater Lake (A16), y en el CALM de Limnopolar Lake (A25).

Estación nivométrica

Desde principios de 2017, en el sitio CALM de Crater Lake, se encuentra instalada una estación nivométrica multiparamétrica, consistente en 6 sensores desarrollados por *Sommer GmbH* para la medida de parámetros ambientales, de temperatura y de propiedades de la nieve. A esta estación se le ha acoplado un sensor de radiación IR y total, incidente y reflejada, *CRN10* de *Campbell Scientific*. El conjunto de sensores es capaz de medir hasta 32 parámetros ambientales y de la nieve (Tabla 4), incluyendo temperatura y humedad del aire, temperatura de la superficie, temperatura de la nieve, espesor, peso, densidad, o contenido en agua y en hielo del paquete de nieve, y a distintas alturas sobre el terreno. Los datos de estos sensores son almacenados en un registrador de datos MD1 de *Sommer GmbH*, y son alimentados por una batería de 12V cargada con un panel solar de 30W, que permite la toma de datos de forma horaria sin interrupción a lo largo del año.

Si bien es una única estación, permite obtener datos de gran precisión que pueden ser comparados y correlacionados con los medidos por los termónivómetros repartidos por la malla CALM anteriormente descritos, así como disponer de datos adicionales para el entendimiento de las variables ambientales más importantes.

Tabla 4: Parámetros (y unidades) medidos por los distintos instrumentos integrados en la estación nivométrica situada en isla Decepción, Antártida (Modificado de de Pablo et al., 2020).

AMBIENTAL	TEMPERATURAS	PROPIEDADES DE LA NIEVE
Fecha y hora	Temperatura interna (°C)	Contenido en hielo total (%)
Temperatura del aire (°C)	Temperatura superficial IR (°C)	Contenido en agua total (%)
Humedad relativa (%)	Temperatura superficial (°C)	Densidad total (kg/m ³)
Piranómetro incidente (W/m ²)	Temperatura a 10 cm (°C)	SWE total (mm)
Piranómetro reflejado (W/m ²)	Temperatura a 20 cm (°C)	Contenido en hielo a 10 cm (%)
Pirgeómetro incidente (W/m ²)	Temperatura a 40 cm (°C)	Contenido en agua a 10 cm (%)
Pirgeómetro reflejado (W/m ²)	Temperatura a 80 cm (°C)	Densidad a 10 cm (kg/m ³)
	Temperatura a 100 cm (°C)	SWE a 10 cm (mm)
		Contenido en hielo a 30 cm (%)
		Contenido en agua a 30 cm (%)
		Densidad a 30 cm (kg/m ³)
		SWE a 30 cm (mm)
		Contenido en hielo a 50 cm (%)
		Contenido en agua a 50 cm (%)
		Densidad a 50 cm (kg/m ³)
		SWE a 50 cm (mm)
		Peso de la nieve (kg/m ²)
		Espesor de nieve (cm)

Humedad del terreno

Como resultado de una colaboración internacional con el fin de evaluar la importancia de las medidas de la humedad del terreno a distintas profundidades para la interpretación de los datos de temperaturas del terreno, en la campaña 2022-23 se ha realizado la instalación de varios dispositivos de medida de este parámetro, 4 de ellas en estaciones PT de la red PERMATHERMAL.

Estos dispositivos, MicroLog SDI-MP fabricados por EMS-Brno, se basan en la técnica de la reflectometría de dominio de tiempo (*Time Domain Reflectometry*, TDR). Para ello, están equipados con 3 o 4 sensores de medición de humedad CS650 (*Campbell Scientific*) de 10 cm de longitud (Tabla 5). Cada uno de estos sensores se ha instalado horizontal o verticalmente según el caso, para registrar datos a una profundidad específica o en un rango de 10 cm de profundidad, respectivamente. En general, cada dispositivo ha sido configurado para la medición del contenido volumétrico del agua (en %), aunque en dos casos la configuración se ha ajustado para registrar también la Conductividad Eléctrica (CE). Estos casos están relacionados con la presencia de dispositivos AERT para el monitoreo geofísico de suelos congelados que tiene instalado en las estaciones de la red PERMATHERMAL, investigadores del programa polar portugués PROPOLAR, como resultado de una colaboración internacional.

Los dispositivos cuentan con una memoria de 256 Kb, que le permite almacenar hasta 100.000 registros, todo ello alimentado con una pila AA de litio de 3.6V que le confiere una autonomía de más de dos años. La descarga de datos se realiza por medio de pulsos infrarrojos mediante el cable específico adosado al dispositivo (no requiere por tanto conexión directa), y conectado a un equipo con sistema operativo Windows y el software Mini32 desarrollado por la misma empresa.

Las estaciones PT en las que se ha instalado estos instrumentos son, debido al reducido número de dispositivos disponibles, aquellas (1) más representativas del entorno y (2) en las que las condiciones del suelo permitían su instalación en profundidad, quedando descartadas inicialmente estaciones situados en terrenos más rocosos. Así, se ha instalado en las estaciones CL33 del CALM Crater Lake en isla Decepción, en la estación LL de la red PT, pero también asociada a la malla CALM Limnopolar Lake de isla Livingston. En esta misma isla se ha instalado en las estaciones SO y CR (Tabla 5).

Tabla 5: Síntesis de las características de la instalación de dispositivos TDR para la medición de la humedad del terreno a distintas profundidades en las islas Livingston Y Decepción, Antártida.

DISPOSITIVO	CÓDIGO	PARÁMETROS	SENSOR	POSICIÓN	PROFUNDIDAD (cm)
A22040732	LL	VWC	1	Horizontal	5
			2	Vertical	20-30
			3	Vertical	50-60
			4	Horizontal	80
A22040728	SO	VWC & EC	1	Horizontal	5
			2	Vertical	20-30
			3	Horizontal	50
A22040729	CR	VWC	1	Horizontal	5
			2	Vertical	20-30
			3	Horizontal	50
A22040737	CL	VWC & EC	1	Horizontal	5
			2	Horizontal	20
			3	Horizontal	30
			4	Horizontal	50

Movimientos del terreno

De forma experimental, en la campaña 2022-23 se ha realizado la instalación de 2 dispositivos medidores de la inclinación que, adosados a un aparato de construcción casera, permitiría establecer la existencia de movimientos en la vertical asociados a los procesos de congelación-descongelación que ocurren en los suelos antárticos. Para ello, también se han utilizado dispositivos de la misma tecnología que los sensores de temperatura

instalados en toda la red. En esta ocasión se han empleado los del modelo M-Log5-Tilt de *Geoprecision*, dotados de un inclinómetro triaxial capaces de medir inclinaciones con una resolución de 0.0055 grados y una precisión de 0.1 grados. Además, mide temperaturas con una resolución de 0.06 °C, y una precisión de 1 °C. Estos dispositivos también se alimentan con una pila AA de litio de 1.5V que le proporciona autonomía para más de 5 años, mientras que su memoria, de 2 Mb, le permite registrar 400.000 valores, o lo que es lo mismo, 100.000 medidas, suficiente para registrar datos de forma horaria durante más de 11 años. Su descarga de datos se hace igualmente a través del software Flexgate 2 de *Geoprecision*, bajo un sistema operativo Windows.

Cada dispositivo se ha adosado de forma horizontal a un instrumento construido según las indicaciones establecidas en la bibliografía ([Gruber, 2020](#)), consistente en un brazo horizontal sujeto en un extremo, y mediante una rótula móvil, a un mástil anclado en profundidad en el permafrost de tal manera que se asegura que ese extremo permanece siempre a la misma altura. En el otro extremo del brazo horizontal en el que se sitúa el sensor, se encuentra sujeto a un pie vertical, mediante una pieza de doble rótula. El pie se encuentra apoyado directamente sobre la superficie del terreno, moviéndose arriba o abajo a medida que el terreno se congele o descongele, respectivamente. Ese movimiento del pie genera que el brazo horizontal y, por tanto, el sensor, dejen de estar horizontales y se inclinen, quedando dicho movimiento registrado por el sensor. Siguiendo las recomendaciones del propio autor del dispositivo ([Gruber, 2020](#)), se ha empleado acero inoxidable en lugar de madera para soportar mejor las condiciones ambientales y humedad del territorio polar.

Estos dos dispositivos han sido instalados en dos estaciones en las que por las condiciones del terreno se podrían esperar dichos procesos de levantamiento y subsidencia: La estación LL en la península de Byers de isla Livingston, y en la estación CL3 de isla Decepción. En ambos emplazamientos, por el carácter granular de los materiales del terreno, y la abundante presencia de agua en el subsuperficial, cabría esperar que los procesos de congelación-descongelación produzcan los cambios en el nivel del terreno. En el caso de la estación LL, se han observado en el área lóbulos de gelifluxión, por lo que es altamente probable que se den dichos movimientos.

En función de los resultados, se plantea extender este tipo de instrumentos a otras de las estaciones de la red PERMATHERMAL.

Campaña antártica 2022-23

Desarrollo de la campaña

Desarrollo general

La Campaña Antártica Española 2022-23 se ha desarrollado en un escenario de reducida complejidad debido a las menores restricciones relacionadas con la pandemia mundial causada por la expansión de la infección por coronavirus SARS-CoV2 (COVID-19), y que en España supuso el establecimiento de un estado de Alarma del 11 de marzo de 2020 al 8 de mayo de 2021, con las consiguientes complejidades logísticas y sanitarias en las consiguientes campañas. En esta campaña no existían inicialmente restricciones o cuarentenas más allá de los necesarios certificados de vacunación COVID y pruebas diagnósticas (PCR o antígenos) negativas previas al inicio del viaje de ida hacia la Antártida, y también al embarque en los buques/vuelos hacia la Antártida. Una novedad de esta campaña, que implicó complicaciones logísticas al equipo PERMATHERMAL, fue la participación, por primera vez, del buque de investigación “Santos Hermanos Cirilo y Metodio” de Bulgaria, que daría apoyo al programa polar español en la presente campaña. Sin embargo, sucesivos retrasos implicaron cambios continuos y repentinos en el calendario de la campaña, resultando en cambios en los puertos de entrada/salida de la Antártida, la necesidad de realizar periodos de cuarentena de 6 días en Punta Arenas (Chile), pérdida de la visita a zonas de trabajo, etc.

Personal investigador

El personal investigador desplazado a la zona de estudio se redujo a una persona con la experiencia antártica (14 campañas previas) y en el mantenimiento de las estaciones PT y CALM, como para poder desarrollar las labores requeridas en ese territorio con las añadidas condiciones existentes en la campaña 2022-23. El investigador responsable del mantenimiento fue Dr. D. Miguel Ángel de Pablo Hernández, profesor Titular de Universidad, adscrito al área de Geodinámica Externa de la Unidad Docente de Geología, del Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Alcalá, responsable de la red de estaciones PERMATHERMAL.

Calendario de campaña

A pesar de los sucesivos cambios, el calendario de la campaña ha resultado, al final, similar al de otros años en cuanto a número de días de campaña, incluyendo los movimientos entre las islas Decepción y Livingston donde se encuentran las estaciones de la red PERMATHERMAL, con tiempo suficiente en cada emplazamiento para el desarrollo de las actividades de mantenimiento de dichas estaciones.

A pesar de los citados inconvenientes, se ha podido realizar una campaña de trabajo normal en los emplazamientos de isla Decepción y de las penínsulas Byers y Hurd en isla Livingston, con el fin de cubrir los objetivos planteados.

De esta forma, la campaña se desarrolló entre los días 26 de enero y 22 de marzo de 2023, con los siguientes hitos:

- 26 de enero: Salida de España
- 27 de enero: Llegada a Buenos Aires (Argentina) y vuelo a Santiago de Chile (Chile). Noche en Santiago de Chile.
- 28 de enero: Vuelo de Santiago de Chile a Punta Arenas e inicio de la cuarentena.
- 5 de febrero: Vuelo de Punta Arenas (Chile) a isla Rey Jorge (Antártida) y embarque en BIO Hespérides. Inicio del tránsito a Byers.
- 6 de febrero: Desembarco en Península Byers, isla Livingston, e inicio de tareas.
- 24 de febrero: Cierre del Campamento Byers y tránsito en BIO Hespérides a península Hurd. Acomodación en BAE Juan Carlos I, e inicio de tareas.
- 3 de marzo: Tránsito en B/O "Santos Hermanos San Cirilo y San Metodio" a isla Decepción. Acomodación en BAE Gabriel de Castilla e inicio de trabajos.
- 15 de marzo: Embarque en BIO Hespérides y tránsito a Isla Rey Jorge.
- 17 de marzo: Vuelo entre isla Rey Jorge (Antártida) y Punta Arenas (Chile). Alojamiento en Hotel a la espera de iniciar viaje de regreso
- 21 de marzo: Salida en avión de Punta Arenas (Chile)
- 22 de marzo: Llegada a España y finalización de campaña

Condiciones meteorológicas

Durante esta campaña, al igual que la anterior, no se puede destacar la existencia de días de condiciones muy favorables para el trabajo de campo., si bien cabe destacar muchos días de viento y lluvia durante la primera fase de los trabajos, coincidiendo con la estancia en la península de Byers en la isla Livingston. No es de destacar muchos días de nevadas abundantes o ventiscas que impidieran la realización de las salidas de campo requeridas, pero si abundantes días de fuertes vientos que, junto con la lluvia, limitaban las tareas a realizar considerando lo delicado de algunos de los instrumentos o la necesidad de usar equipos informáticos portátiles en el campo para el volcado de datos.

A pesar de estos días de lluvia y viento, las condiciones no han producido retrasos o complicaciones importantes en las tareas de mantenimiento de las estaciones PT o la toma de datos in situ en las estaciones CALM, por lo que han podido cumplirse los objetivos marcados para la campaña.

Desarrollo de las tareas

El equipo investigador desplazado a la zona de estudio pudo realizar el mantenimiento de las estaciones PT y CALM situadas en la isla Decepción, y en la isla Livingston, incluyendo en el emplazamiento de península Byers. En todas las fases de la campaña se contó, cuando así fue necesario, con el apoyo de personal técnico de las bases antárticas para poder realizar algunas de las tareas necesarias. Un ejemplo de ello es la toma de datos de espesor de capa activa/espesor de suelo descongelado en la malla CALM Crater Lake, que se contó con el apoyo de varios miembros de la dotación. En el caso de la medida en el CALM Limnopolar Lake, se contó con la colaboración de investigadores del proyecto PARANTAR (I.P. Jesús Ruíz, Universidad de Oviedo). Investigadores de este proyecto también colaboraron con el mantenimiento de las estaciones PT de isla Livingston, así como con la instalación de algunos de los nuevos sensores de humedad del terreno.

Durante la estancia en la isla Decepción se realizó el mantenimiento de todas las estaciones situadas en la misma, incluyendo algunas estaciones PT pertenecientes a la red PERMANTAR, de la Universidad de Lisboa, Portugal, con quien se colabora estrechamente desde el año 2000. Durante esta fase de la campaña se procedió a retirar algunos sensores e instrumentos pertenecientes, por un lado, a experimentos temporales, y por el otro a instrumentos obsoletos.

Debido a la falta de sensores, no pudo realizarse la reinstalación de algunas experiencias, como los termónivómetros de alta resolución o la temperatura del suelo distribuida en el CALM Crater Lake en isla Decepción. Se trataba de instrumentaciones secundarias, y se había priorizado la renovación de los instrumentos principales de las estaciones PT y CALM.

En la fase de trabajo en península Byers de la isla Livingston, se procedió a la retirada de la cámara fotográfica automática más antigua, pero no se tocó la instalación, ya que es utilizada para dar soporte a otra de las cámaras, más modernas, instaladas en el año 2017 para su reemplazo. Queda pendiente la retirada de las baterías y el panel solar, o la instalación de algún instrumento que resulte de interés y que pueda hacer uso de estos elementos electrónicos.

También en península Byers se realizó la instalación de los sensores de temperatura en el sondeo de la estación del lago Domo (DO) incorporada a la red en la campaña 2021-22, cedida por el investigador Marc Oliva de la Universidad de Barcelona.

Finalmente, en la fase de trabajo en península Hurd de la isla Livingston, se tuvieron días suficientes de trabajo para la realización de todo el mantenimiento de las estaciones, si bien el cambio de fecha del tránsito hacia isla Decepción dejó pendiente algunas tareas menores completadas por investigadores del proyecto PARANTAR anteriormente mencionado.

En los tres emplazamientos de trabajo, además de los citados mantenimientos y tomas de datos in situ, se procedió a la instalación de los nuevos dispositivos para la medida de la humedad del terreno a distintas profundidades como colaboración con investigadores de la República Checa y de Portugal, y también a los de medida de los movimientos de levantamiento y subsidencia del terreno.

Consecución de objetivos

Con todas las actividades realizadas, se ha conseguido alcanzar el 99% de los objetivos marcados para la campaña 2022-23 (Tabla 6), realizándose la toma de datos de los dos sitios CALM con los que cuenta la red PERMATHERMAL; el volcado de datos de todas las estaciones PT; la recuperación de imágenes de las cámaras fenomenológicas instaladas, y de la estación nivométrica de la red. Además, se realizó la instalación de los nuevos sensores de medida de espesor de nieve, de movimientos del terreno, y de humedad del

PERMATHERMAL

suelo. Quedó pendiente únicamente la instalación de sensores de temperatura del suelo y del terreno en la estación GL, que resultó imposible por la presencia de hielo.

Además, se pretendía instalar una serie de estaciones auxiliares en distintos puntos de la isla Livingston, con el fin de crear una red perimetral. De los 5 puntos planteados para las nuevas instalaciones, solo pudo realizarse en 2 de ellos, en Punta Hannah y en Punta Barnard, quedando pendientes de lo Cabo Shirref, Punta Siddinds en el norte de la isla, y Punta Elefante en la parte Sur de la misma.

Tabla 6: Síntesis de los principales objetivos marcados para la campaña antártica 2022-23, y grado de consecución de estos.

	PRIORIDAD	OBJETIVO	% COMPLETADO
1	Volcado de datos	Recuperar los datos adquiridos por los sensores en los distintos emplazamientos durante el año 2022	100%
2	Medida del espesor de la capa activa	Medición del espesor de la capa activa en los sitios CALM de Byers y Decepción, y otras medidas auxiliares	100%
3	Mantenimiento de las estaciones	Realizar las reparaciones y mejoras necesarias en las estaciones para permitir su funcionamiento durante el año 2023	100%
		Renovación/reemplazo de sensores de temperatura para estimar espesor de nieve, por sensores de espesor de nieve.	100%
4	Colaboración con la red PERMANTAR (Univ. de Lisboa)	Mantenimiento de algunos instrumentos de sus estaciones para el estudio del permafrost en la isla Decepción y Livingston	100%
5	Instalación de sensores de humedad del suelo (Universidades de Masaryk, Alcalá, y Lisboa)	Realizar la instalación inicial de sensores de humedad del suelo a distintas profundidades en 5 de las estaciones de las redes PERMATHERMAL y PERMANTAR	100%
6	Ampliación de la red PERMATHERMAL	Instalación de 5 nuevas estaciones para medida de la temperatura del aire y de la superficie del suelo en el entorno de la isla Livingston (Punta Barnard, Punta Hannah, Punta Elefante, Cabo Shirref, y Punta Siddins).	40%
7	Instalación de sensores de movimiento del terreno por congelación	Instalación, en 2 de las estaciones de la red PERMATHERMAL, de sensores para la detección de los movimientos verticales del terreno debido a procesos de congelación/descongelación	100%

El estado de las estaciones y mantenimientos realizados

En general, el estado en el que se han encontrado las estaciones de la red PERMATHERMAL durante la visita realizada a ellas durante la campaña antártica ha sido muy bueno.

En isla Livingston, en la península Byers no se observaron problemas en los instrumentos, y se procedió a retirar la cámara CAM1A, ya obsoleta. El resto de los instrumentos no requirió mantenimientos adicionales. Por otro lado, en península Hurd, tampoco se encontraron problemas especiales, salvo que el mástil de la estación SO se encontraba inclinado debido a que el viento lo había doblado cuando uno de los vientos que lo sujetaban se había soltado. Se procedió a enderezar el mástil y a volver a anclar los vientos, evitando el tensor que se había soltado por la acción del viento. También cabe destacar que la sonda de la estación GL no tomó datos durante todo el año, si bien no se han detectado fallos en la electrónica. En cualquier caso, esta estación será retirada, probablemente, en la siguiente campaña, cuando se retire el hielo que cubre el sondeo y pueda hacerse el cambio de sensores.

En isla Decepción, solo cabe destacar la existencia de problemas en tres instrumentos. Por un lado, en la estación nivométrica, donde la batería estaba completamente agotada y además rotura de los tensores de las bandas para la medida de las propiedades de la cubierta nival, si bien los sensores no estaban dañados. Por otro lado, en la estación CL4, el termonivómetro había sido derribado por el viento, por lo que sus datos no son válidos. Se ha procedido a su reinstalación y a la sujeción con vientos de cuerda y piquetas metálicas para evitar el mismo problema en los siguientes inviernos.

En cuanto a la estación CL-3, se retiró la totalidad de la electrónica que quedó pendiente de retirar la campaña anterior: registrador de datos, batería, caja estanca, y panel solar. Dejando únicamente el mástil en el que se instaló el sensor de temperatura del aire la campaña anterior. De esta forma, queda completamente desmantelada la instrumentación antigua.

El resto de las estaciones visitadas, no mostraron problemas y sólo se requirió el tensado de los vientos para su afianzamiento.

Cambios de instrumentación

Retirada de instrumentación

Durante la presente campaña se ha procedido a la retirada de varios experimentos, tanto en isla Decepción como en isla Livingston.

En la zona de Crater Lake se procedió a la completa desmantelación de la cámara fenomenológica 1A originalmente instalada en 2008, dejando únicamente la que se instaló en 2017 para reemplazarla.

El experimento de temperatura superficial distribuida en la malla CALM de Crater Lake, tampoco ha podido ser reinstalado por falta de sensores para ello, pero se plantea volver a instalarlo en el futuro. Esta retirada no implica eliminación de elementos del terreno, pues ya habían sido retirados dos campañas atrás. Igualmente, no se retiraron los mástiles de los termónivómetros de alta resolución de ese mismo emplazamiento, pues se espera poder reinstalar los sensores en el futuro.

También en Crater Lake, y como se ha comentado, se ha procedido al desmontaje parcial de la estación DEC-S3, pues se ha retirado el resto de los elementos pendientes de la campaña anterior: la caja de electrónica, panel solar, batería y un sensor de temperatura del aire.

Por otro lado, en la isla Livingston, en la península Hurd no se ha retirado ningún elemento, mientras que en península Byers, se ha retirado la cámara fenomenológica 1A.

Instalación de nuevos instrumentos

Durante la campaña 2022-23 se ha realizado la instalación de algunos elementos, con el fin de complementar la instrumentación existente. Así, se instalaron sensores de espesor de nieve en todas las estaciones excepto en DO, CL-4, y los experimentos de espesor de nieve distribuida en los CALM Limnopolar Lake y Crater Lake.

Además, se instalaron 4 dispositivos para la medida de la humedad del suelo a distintas profundidades en las islas Livingston (estación LL en península Byers, y estaciones SO, y CR en península Hurd) y Decepción (estación CL33) aire.

No se ha podido completar la reinstrumentalización de la temperatura de la superficie ni la temperatura del terreno en la estación GL de isla Livingston por

encontrarse cubierta por aproximadamente 1 m de hielo, quedando pendiente para la siguiente campaña.

En la estación de SO de isla Livingston procedió a realizarse la instalación del nuevo dispositivo M-Log5-String con sonda termométrica, una vez recuperado el sondeo en la campaña anterior. Igualmente se hizo en la estación DO de isla Livingston, donde también se instaló el mismo tipo de dispositivo y sonda termométrica en el sondeo.

De la misma forma, se realizó la instalación de dos dispositivos para la medida de los movimientos de levantamiento y hundimiento del terreno en los sitios CALM de Crater Lake y Limnopolar Lake, en isla Livingston y Decepción, respectivamente.

Además de estas cuestiones, cabe destacar que en la presente campaña se ha procedido a realizar la instalación de 2 nuevas estaciones para la red, si bien no se trata de estaciones PT en sentido estricto, pues solo se ha instalado instrumentación para la medida de la temperatura del aire y de la superficie del suelo, asociados a un mástil metálico con vientos de cuerda. Estas estaciones han sido ubicadas en Punta Barnard y Punta Hannah de la isla Livingston, quedando pendientes para otros años la instalación de estaciones similares en Cabo Shirref, Punta Siddins, y Punta Elefante.

Estas 5 estaciones configurarán una red perimetral a la isla Livingston que, junto con las estaciones PT establecidas, permitirán conocer cual es la variabilidad de estos parámetros (temperatura del aire y del suelo) en la isla, así como la variabilidad de acumulación de nieve en dicho perímetro. Este tiene por objeto empezar a establecer estudios a escala más regional dentro de la propia isla Livingston, además de localizar posibles emplazamientos para extender la red PERMATHERMAL por la isla, ya que el uso de los nuevos dispositivos permite una mayor autonomía y, por tanto, la toma de datos en lugares más remotos y menos visitados.

Incidencias

Sin incidencias que destacar en la realización de la campaña Antártica 2022-23 para el mantenimiento de las estaciones PT y CALM en las islas Livingston y Decepción, Antártida.

Datos del año 2021

Generalidades

Durante la campaña antártica 2022-23 se han recuperado un total de 6,67 Gb de datos en un total de 5144 archivos relacionados con 70 mediciones, 92 dispositivos y unos 441 sensores instalados en las zonas antárticas de estudio de la red PERMATHERMAL, incluyendo las fotografías de las cámaras fenomenológicas y la estación nivométrica.

Cabe destacar, por un lado, la reducción en el número de archivos, debido a la reducción en el número de dispositivos de tipo *iButton* como consecuencia del proceso de renovación iniciado la campaña anterior, en el que se instalaron una gran cantidad de dispositivos con múltiples sensores acoplados al mismo registrador de datos. Esta evolución continuará la próxima campaña ya que durante la actual se ha seguido con la renovación de dispositivos, en esta ocasión con la reposición de los sensores de medida de la nieve, pasando de 7 dispositivos por termonivómetro para la medida de la temperatura del aire a distintas alturas sobre el suelo con la que se aproximaba el espesor de nieve, a uno solo capaz de medir altura de nieve sobre el suelo.

Todos los dispositivos renovados han funcionado correctamente, devolviendo datos horarios en todos los parámetros en los que se instalaron, tal y como fueron programados, no habiéndose detectado inconsistencia de datos ni problemas de alimentación de ningún tipo.

Respecto a los sensores no renovados, se han registrado algunas pérdidas de datos, como solía ser normal debido a fallos individuales de los dispositivos, o a fallos en la electrónica (registrador de datos o alimentación, principalmente). Estos fallos, causados por la antigüedad de los instrumentos y su exposición a las duras condiciones ambientales reinantes en la zona de estudio de la Antártida, hacen que siga habiendo pérdida de datos que afectan a la calidad de la serie temporal. Sin embargo, gracias a la renovación realizada, en esta ocasión solo ha afectado a medidas auxiliares, no a los instrumentos principales de la red, por lo que la continuidad del estudio del régimen térmico del permafrost y la capa activa no peligran. La renovación de la instrumentación llevada a cabo en la presente campaña pretende terminar definitivamente con estos problemas y reducirlo a casos esporádicos y aislados.

Disponibilidad de datos

La disponibilidad de datos es muy distinta en función de los instrumentos y su emplazamiento (Tabla 7) y, en otros casos, aunque los datos están disponibles, su validez puede no serlo por distintas circunstancias relacionadas con el fallo de sensores, las condiciones meteorológicas u otras circunstancias. Cabe destacar cómo el tipo de sensor utilizado para la toma de datos afecta a la disponibilidad de datos (Tabla 7).

Tabla 7: Síntesis general de la disponibilidad de datos de los distintos sensores e instrumentos de las estaciones de monitorización de la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción de la Antártida. AT: Temperatura del aire.; ST: Temperatura de la nieve; GST: Temperatura de la superficie; GT: Temperatura del terreno.; TTOP: Temperatura del techo del permafrost; TLC: Cámara time-lapse; SPA: Estación nivométrica; [●]: con datos; [◐]: datos parciales; [○] sin datos o con datos no válidos; [□] instrumento temporalmente sin sensores; [] No existe dicha instrumentación.

LUGAR	ZONA	ESTACIÓN	CÓDIGO	TIPO	INSTRUMENTACIÓN							
					AT	ST	GST	GT	TTOP	TLC	SPA	
Isla Deception	Crater Lake	Crater Lake	A16	CALM-S	●	□	□			●	●	●
			CL-S1	PT	●	◐	●	●				
			CL-S2	PT	●	◐	●	●				
			CL-S3	PT	●	◐	●	●				
			CL-S4	PT		○	●	●				
			CL-S33	PT		◐	●	●				
			CL-S77	PT		●	●	●				
Isla Livingston	Península Byers	Limnopolar Lake	A25	CALM-S		◐	◐				●	
			LL-S1	PT	●	●	●	●				
			LL-S2	PT				●				
	Península Hurd	Domo	DO	PT	●	□	●	□				
			BAE-Juan Carlos I	JC	PT	●	◐	●				
			Nuevo incinerador	NI	PT	●	◐	●	●			
			Incinerador	IN	PT	●	◐	●	●			
			Collado Ramos	CR	PT	●	◐	●	●			
			Morrena	MO	PT	●	◐	●				
			Glaciar	GL	PT	●	□	□	◐			
			Sofia	SO-1	PT	●	◐	●	●			
				SO-2	PT					◐		

Así, los dispositivos empleados para la medida de la temperatura del aire (AT), de la superficie (GST) y del terreno (GT) a distintas profundidades en prácticamente todas las estaciones (con la excepción de GL y SO), son diversos modelos del dispositivo *Geoprecision* M-Log5W, que no han fallado. Sin embargo, los dispositivos para la toma de datos en los termónivómetros (ST) o para la medida de la temperatura superficial distribuida por las mallas CALM, son de tipo *iButton*, no preparados para soportar la intemperie en todas las condiciones, y además con batería interna no reemplazable y memoria más limitada. En todo caso, en los termónivómetros (ST) hay varios dispositivos

midiendo en cada uno de ellos, por lo que el fallo de uno de ellos es suficiente para ser categorizado como “perdida parcial de datos”, a pesar de que los demás datos estén disponibles.

A continuación, se describen los datos disponibles de cada tipo de medición:

Temperatura del aire (AT): Todos los sensores para la medida de la temperatura del aire han funcionado de forma correcta en todas las estaciones no registrándose ninguna incidencia en ellos.

Temperatura de la nieve (ST): Como cabría esperar debido a la exposición de los sensores al ambiente, se han producido pérdida de sensores y sus datos. Sin embargo, estas pérdidas en general son menos graves que las de años pasados, a pesar del envejecimiento de los sensores y la no posibilidad de renovarlos. La pérdida de datos de temperatura de la nieve debido a los numerosos fallos de los sensores individuales (7) que constituyen cada uno de los termónivómetros de la red, ha sido desigual habiendo 3 termónivómetros con todos los sensores operativos, 1 con 6 de 7 sensores operativos, y 3 con 5 de 7. Esto, en general, permitirá obtener aproximaciones relativamente buenas del espesor de nieve en cada emplazamiento.

Temperatura de la superficie (GST): Todos los sensores para la medida de la temperatura de la superficie del suelo en todas las estaciones han funcionado de forma correcta, sin nada que destacar de su funcionamiento.

Temperatura del terreno (GT): En general, se ha podido recuperar datos de todos los dispositivos instalados en los sondeos de todas las estaciones. Las excepciones son las estaciones GL, donde aún se encuentra instalado una cadena termométrica con un registrador de datos de tipo CR1000 de *Campbell Scientific*, y la estación SO, donde en el sondeo 1, recuperado en la pasada campaña tras varios años bloqueado por el hielo, se dejaron instalados sensores de tipo *iButton* hasta poder disponer de la cadena termométrica a medida instalada durante la presente campaña. En el primer caso, se ha producido una importante pérdida de datos en parte del invierno. En el segundo caso, se han perdido solo datos del sensor situado a mayor profundidad.

Espesor de la capa activa (ALT): Se ha podido realizar la medición del espesor de la capa activa tanto en la estación CALM Crater Lake (A16) de la red PERMATHERMAL en isla Decepción, ya que la estación CALM Limnopolar Lake

(A25), situada en península Byers de la isla Livingston. Hay que destacar que la fecha de la medición de la primera es similar a las más tardías en las que se ha medido en otras ocasiones, mientras que en el segundo es coincidente con las medidas realizadas muchos de los años.

Temperatura del techo del permafrost (TTOP): Se han podido recuperar los datos de los 16 sensores instalados en el CALM de Crater Lake, en isla Decepción, el único de los dos sitios CALM donde está instalado este tipo de medida. No se ha detectado ningún problema en los mismos.

Temperatura superficial distribuida (GT): De los 36 sensores instalados en la malla CALM Limnopolar Lake, solo se han podido recuperar y/u obtener datos válidos de 22 de ellos, siendo el resto, o bien datos ausentes por pérdida del sensor, o bien datos irrecuperables debido a fallos del dispositivo.

Espesor de nieve distribuida (ST): Los 3 termónivómetros situados en el CALM Crater Lake no tenían sensores instalados desde hace dos campañas debido a que por falta de presupuesto y por cuestiones logísticas se tuvieron que retirar los sensores para ser utilizados en el mantenimiento de las estaciones de isla Livingston. Sin embargo, se han recogido los sensores de los otros 3 termónivómetros situados en el CALM del Limnopolar Lake. En ellos, aunque han presentado fallos en alguno de los sensores (3, 5, y 6 sensores dañados de los 15 instalados en cada uno de ellos), presentan datos válidos de temperatura por lo que se podrán derivar el espesor de nieve y con lo que a su vez se podrá realizar mapas de espesor de nieve en ese sitio CALM.

Parámetros nivológicos (SPA): Este año la estación nivométrica no ha sufrido daños importantes en su infraestructura, más allá de algunos vientos sueltos, y se han podido recuperar datos registrados a lo largo del año 2022. Sin embargo, los datos son muy escasos, con muy importantes pérdidas del 22 de mayo de 2022 hasta el 9 de marzo de 2023, cuando fue revisada.

Fotografías fenomenológicas (TLC): En la actualidad se tienen 3 cámaras modernas instaladas (1 en el CALM Crater Lake y 2 en el CALM Limnopolar Lake), y se han podido recuperar imágenes de todas ellas, sin interrupciones ni cortes en la secuencia esperada. En una revisión preliminar no se han observado cambios de encuadre y pérdidas de enfoque, si bien, como ocurre algunos años, si que se han observado muchas imágenes que no aportarán muchos datos ya que la lente se encontraba cubierta de hielo durante el invierno causado por las ventiscas.

Temperatura del Aire

Las temperaturas del aire registradas durante el año 2022 (Fig. 5) se mantienen entre los -14°C de mínima, alcanzados a mediados del mes de julio, y los 10°C alcanzados a principios de enero de ese año. A diferencia de los años 2020 y 2021, no cabe destacar picos de calor importantes, ya que las temperaturas más altas nunca llegan a los 10°C en los veranos. Temperaturas más bajas registran repetidas mínimas puntuales a lo largo del otoño, de entre -5°C y -14°C .

Entre las estaciones, cabe destacar una gran similitud en su evolución térmica, siendo las diferencias entre estaciones debido a sus diversas ubicaciones y altitudes, menos a aproximadamente 1°C . En todas ellas se observa que las variabilidades térmicas a corto plazo son más importantes durante el invierno que el verano, registrándose por ejemplo cambios de hasta 14°C durante el invierno, y de apenas 3 o 4°C durante los veranos, aunque en algunos momentos puntuales pueden llegar a ser de hasta 10°C cuando se producen los picos de calor.

En verano las temperaturas medias rondan los 3°C - 4°C , mientras que durante la primavera las temperaturas medias se posicionan en rangos positivos de entre 1°C - 2°C . Este año el final del verano podría establecerse térmicamente a mediados de abril, un mes y medio más tarde que el año 2020, pero aproximadamente por las mismas fechas que en 2021. Este límite viene dado por cuando las temperaturas comienzan a tener una mayor variabilidad y las medias comienzan a descender.

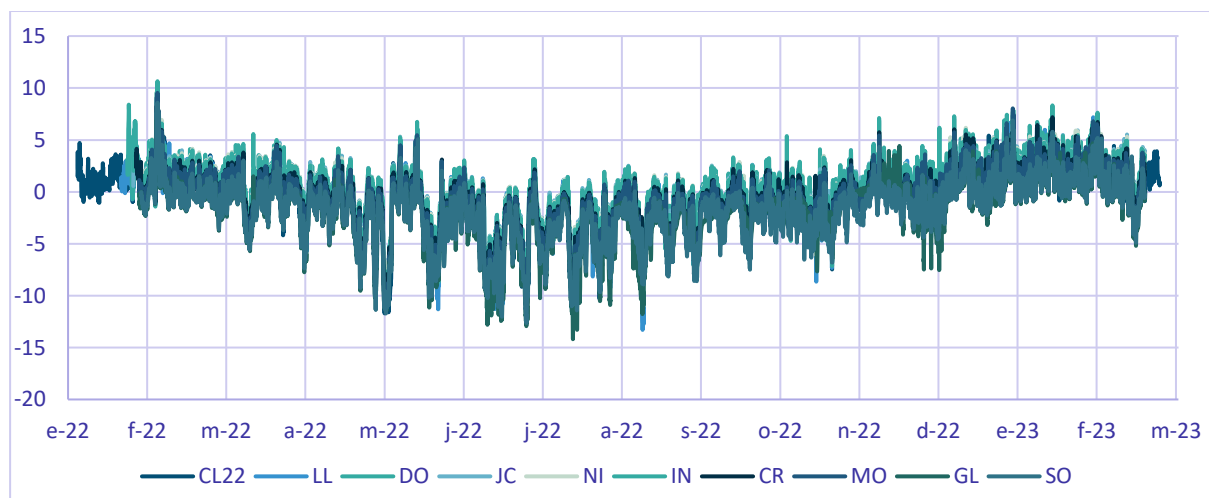


Figura 5: Temperaturas del aire (en $^{\circ}\text{C}$) registradas en las distintas estaciones de la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción, Antártida, entre enero de 2022 y febrero de 2022.

Temperatura de la nieve

Los datos de temperatura del aire a distintas alturas utilizado para derivar los espesores de nieve muestran una desigual cobertura nival en función de las estaciones, como cabía esperar, ya que las distintas ubicaciones y su nivel de exposición facilitan la acumulación en puntos más protegidos, o la dificultad para acumularse la nieve en zonas más venteadas. En general, se observa que las temperaturas del aire a distintas alturas (Fig. 6) tienen un comportamiento similar, como cabe esperar, a los datos de temperatura del aire (Fig. 5).

Estos datos permiten determinar la presencia de nieve, cuando la variabilidad térmica registrada en los sensores inferiores es menor que la de los sensores situados por encima. En los casos en los que se ha podido recuperar más datos es posible ver cómo la cubierta nival empieza a alcanzar un cierto espesor a principios de junio, más tarde que otros años, si bien no es hasta principios de julio cuando la acumulación supera los 40 cm, y hasta septiembre, ya en primavera, cuando se alcanzan los máximos, superándose en algunos casos los 80 cm de espesor. La completa desaparición de la cubierta de nieve se produce en torno a mediados de noviembre en las estaciones donde se alcanzó el mayor espesor (Fig. 6), como las situadas en la zona de Crater Lake en Isla Decepción. La presencia de periodos de estabilidad de la temperatura a 0°C es reflejo de una importante cantidad de agua que se convierte en una capa hielo subnival durante la fase de deshielo de la cubierta de nieve.

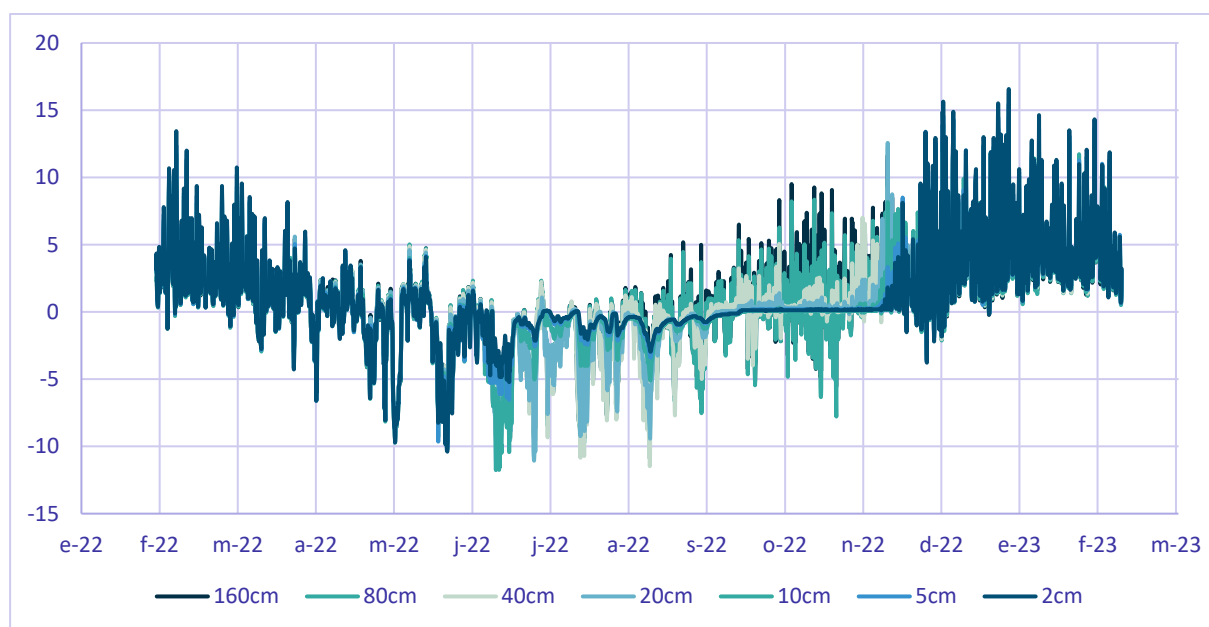


Figura 6: Temperatura de la nieve (en °C) en una de las estaciones de la isla Decepción, mostrando el distinto comportamiento de la temperatura del aire a distintas alturas sobre el suelo cuando existe una cubierta de nieve.

Temperatura de la superficie

La temperatura de la superficie del suelo registrada en todas las estaciones de la red de monitorización (Fig. 7) muestran patrones de comportamiento similar, si bien con distintas amplitudes térmicas, y periodos de descongelación de distinta longitud, relacionado con la distinta duración de la cubierta nival sobre el terreno.

Cabe destacar que mientras en las temperaturas del aire las diferencias entre estaciones son mínimas (Fig. 5), en la temperatura de la superficie del suelo se ve una clara variación del comportamiento de unas a otras. Es en la estación del Monte Reina Sofía donde la amplitud térmica es más reducida que en las estaciones situadas a menor altitud, y donde el periodo de congelación tiene una mayor duración. Destaca la distinta duración del periodo de efecto cortina (ej., [Outcalt et al., 1990](#)), de apenas 1-2 semanas en algunas estaciones, a dos meses y medio en otras. El final del periodo de descongelación del suelo ocurre entre finales de octubre y principios de diciembre de 2022. El inicio del periodo de congelación es también levemente más temprano y brusco en las estaciones situadas a mayor altitud, este ocurre de forma generalizada a mediados de marzo de 2022, como en años anteriores. Las temperaturas máximas del suelo son mayores que en los años 2020 y 2021 llegando hasta los 30°C a finales de 2022 y repitiéndose picos de más de 25°C en enero de 2023. Las más bajas (unos -12°C) se alcanzaron en varias estaciones en mayo de 2022.

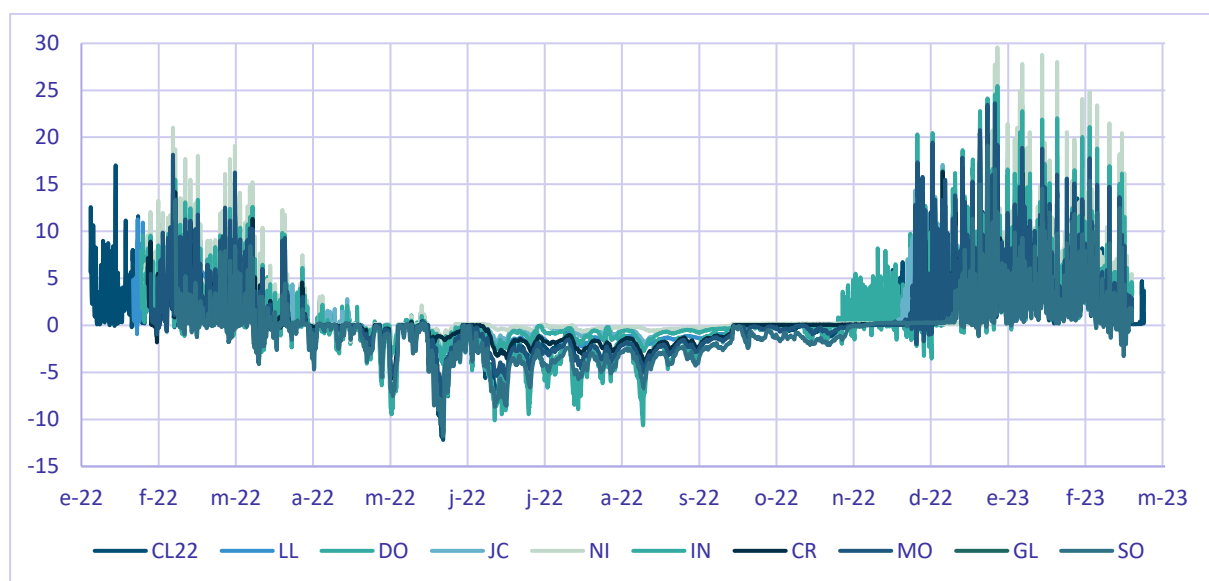


Figura 7: Temperaturas de la superficie del suelo (en °C) registradas en 10 estaciones de monitorización de la red PERMATHERMAL en las Livingston y Decepción de la Antártida, entre enero de 2022 y marzo de 2023.

Temperatura del terreno

Los datos de temperatura del terreno a distintas profundidades medidos por los sensores instalados en el interior de perforaciones que se adentran hasta los 25 m, permiten conocer el estado térmico de la capa activa e incluso del permafrost, cuando la perforación se adentra en él. Los datos de temperatura registrados (Fig. 8) más cerca de la superficie tienen un comportamiento similar a los de la temperatura de la superficie (Fig. 7), registrándose temperaturas de hasta 3°C en el verano de 2023, mucho mayores que los registrados en el verano de 2020 durante la ola de calor que afectó a la zona. Además, la cobertura nival que se puede deducir que comenzó en torno a mediados de marzo, si bien esta fecha es variable de unos emplazamientos a otros, al igual que la fecha de desaparición de esta, registrada entre finales de noviembre y finales de diciembre, según los emplazamientos.

El registro de temperaturas muestra que en muchas estaciones la capa activa finaliza en torno a los 50 cm de profundidad, y que el permafrost se extiende hasta profundidades variables de hasta 5m en las estaciones de isla Decepción, y más de 25 m en las estaciones de península Hurd en isla Livingston. Las temperaturas mínimas, que se alcanzaron este año a finales de mayo, con valores no inferiores a los -7°C, más altas que las del año 2020. Estas oscilaciones térmicas del invierno no afectan a profundidades mayores de 50 cm en invierno.

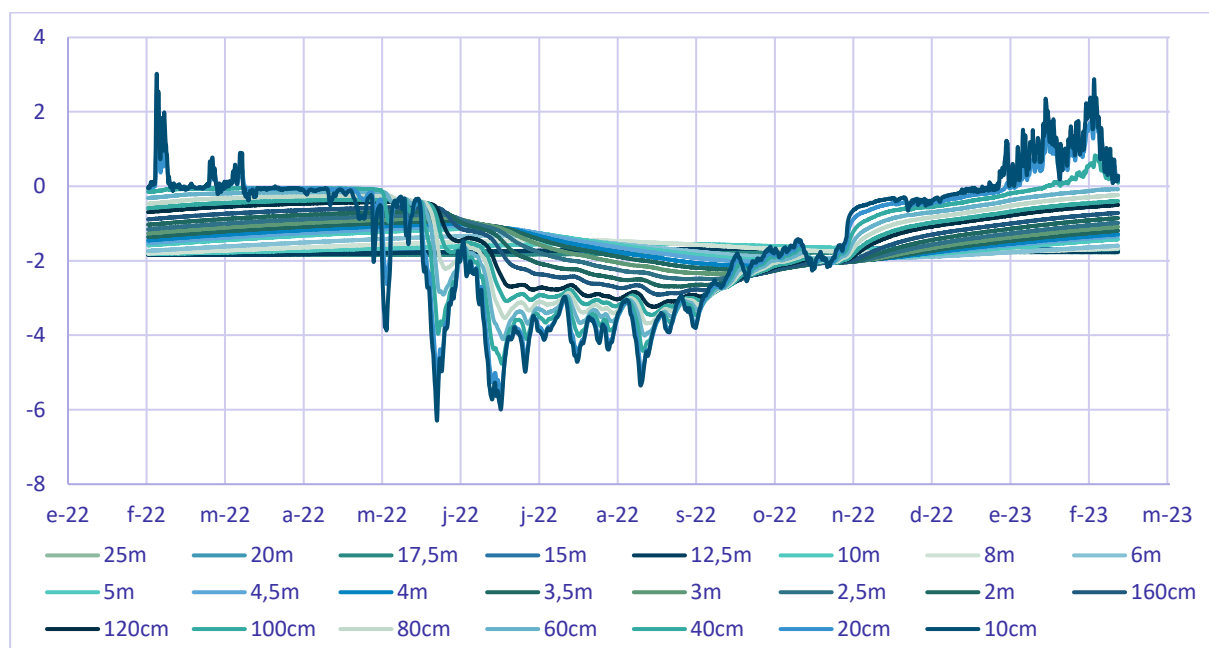


Figura 8: Datos de temperatura del terreno (en °C) registrados a distintas profundidades hasta 25 m en el sondeo LIV_SO-2 en isla Livingston, entre febrero de 2022 y febrero de 2023.

Espesor de la capa activa

Medido mediante el uso de una sonda mecánica manual, se realizó la toma de datos del espesor de la capa activa en ambos sitios CALM. Primero en el sitio CALM Limnopolar Lake (A25) el 7 de febrero de 2023, y posteriormente el sitio CALM Crater Lake (A16), en isla Decepción, el 6 de marzo de 2023 (Fig. 9). De esta forma se continúa tomando datos de forma ininterrumpida en el sitio CALM de Cráter Lake, y con únicamente 2 años sin datos en el CALM de Limnopolar Lake.

Al igual que en años previos, los datos el CALM Limnopolar Lake muestran una cierta variabilidad a lo largo de una de las diagonales de la malla, pasando desde los 10-20 cm de espesor en un sector, a los más de 100 cm en el otro. En cambio, en el CALM Crater Lake, se muestra una importante homogeneidad en toda la malla, con espesores de entre 35 y 45 cm, siendo solo superior o inferior en puntos muy concretos. Aunque dentro de este rango, los valores inferiores se localizan a lo largo del eje Y, en una banda central al eje X de coordenadas relativas, de la misma forma que ocurriera en años anteriores.

Estos valores son muy similares a los medidos el año anterior. En el caso del sitio CALM Crater Lake, es razonable, puesto que solo hay un día de diferencia en la fecha de medida de un año a otro. Sin embargo, en el CALM Limnopolar Lake, hay 15 días de diferencia. Los patrones observados en ambos sitios CALM confirman la no aleatoriedad de los valores, la no existencia de artefactos en los datos, y/o la no existencia de errores sistemáticos en la toma de medida.

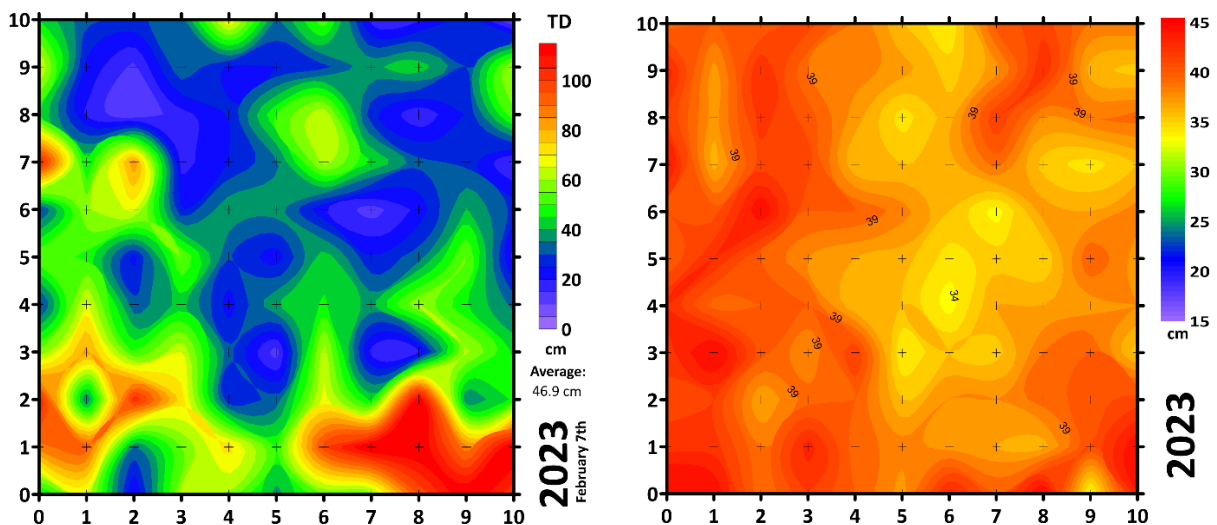


Figura 9: Mapa de espesor de la capa activa medido en los sitios CALM Limnopolar Lake (izquierda) y Cráter Lake (derecha), en Livingston e isla Decepción, el 7 de febrero y el 6 de marzo de 2023, respectivamente.

Temperatura del techo del permafrost

La Temperatura del Techo del Permafrost (TTOP) se mide de forma continuada en 16 nodos de la malla CALM Crater Lake en isla Decepción, si bien este año. En esos datos se puede observar temperaturas próximas a los 0°C durante 6 meses al año (Fig. 10), excepto en los meses de invierno, entre junio y octubre. En este periodo la temperatura del techo del permafrost desciende hasta alcanzar mínimas de algo menos de -3°C, claramente menos frías que el año 2021 que se alcanzaron los -5°C.

A pesar de que el comportamiento térmico en los nodos es muy similar, se puede observar que hay algunas diferencias en algunos de los puntos, donde el periodo de temperaturas cercanas a los 0°C se prolonga hasta bien entrado el invierno, o incluso a lo largo de todo él, como es el caso del nodo (6,8), comportamiento similar al que tuvo el año anterior, y en el que las temperaturas del invierno son mucho menos frías (casi 3° menos) y menos variables que en el resto. Éste es el caso de los nodos (4,2) y (6,6), indicando que estos nodos se han cubierto antes de nieve que ha impedido una transmisión rápida de las temperaturas atmosféricas. En el resto de los nodos esta atenuación de la variabilidad se produce a partir de principio de septiembre, indicando un incremento de la cubierta nival al final del invierno. El proceso de descongelación del suelo comienza a partir de mediados de septiembre en la mayoría de los nodos, cuando se observa que sus curvas de temperatura inician el camino al periodo de estabilidad térmica a 0°C. Estas diferencias se asocian a distinta cobertura de nieve en los distintos nodos de la malla CALM.

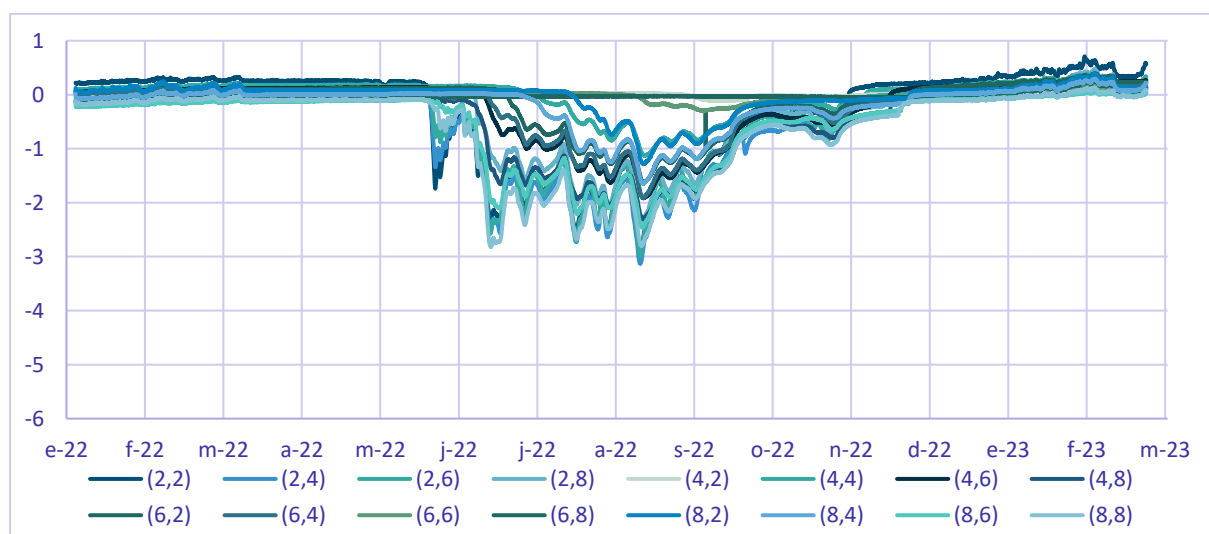


Figura 10: Evolución temporal de las temperaturas del techo del permafrost (en °C) en los nodos de la malla CALM Cráter Lake en isla Decepción, Antártida, entre enero de 2022 y febrero de 2023.

Temperatura superficial distribuida

En el CALM Crater Lake, en isla Decepción, no se pudieron dejar instalados sensores distribuidos por los nodos pares de la malla para la medida de la temperatura superficial distribuida en enero de 22, pero si en la malla CALM Limnopolar Lake en la península Byers de isla Livingston. De los 36 sensores instalados en esta última se han obtenido datos de 22 de ellos, aunque algunos contienen datos espurios por la llegada al final de su vida útil (Fig. 11). En todo caso, los escasos datos disponibles muestran un comportamiento similar a los de la temperatura superficial correspondiente a este emplazamiento (Fig. 7).

Cabe destacar la clara determinación del inicio y fin del periodo de congelación entre principios de marzo y mediados de noviembre de 2022, con diferencias desde unos pocos días hasta 2 semanas al final del periodo, indicando una rápida pérdida de la cobertura nival en primavera a lo largo de la malla. El periodo de descongelación también queda claramente marcado en los datos de todos los sensores, a principios de septiembre como el año previo, tal y como refleja también por la presencia de periodos con temperaturas isotermas a 0°C durante el final del periodo de congelación.

Por otro lado, las temperaturas del periodo de descongelación, tanto en el año 2022 como en 2023, presentan una gran variabilidad, mayor que la del mismo periodo en 2021, con picos de hasta 21°C, mientras que las mínimas del invierno este año llegan hasta los -11°C, a principios de mayo de 2022.

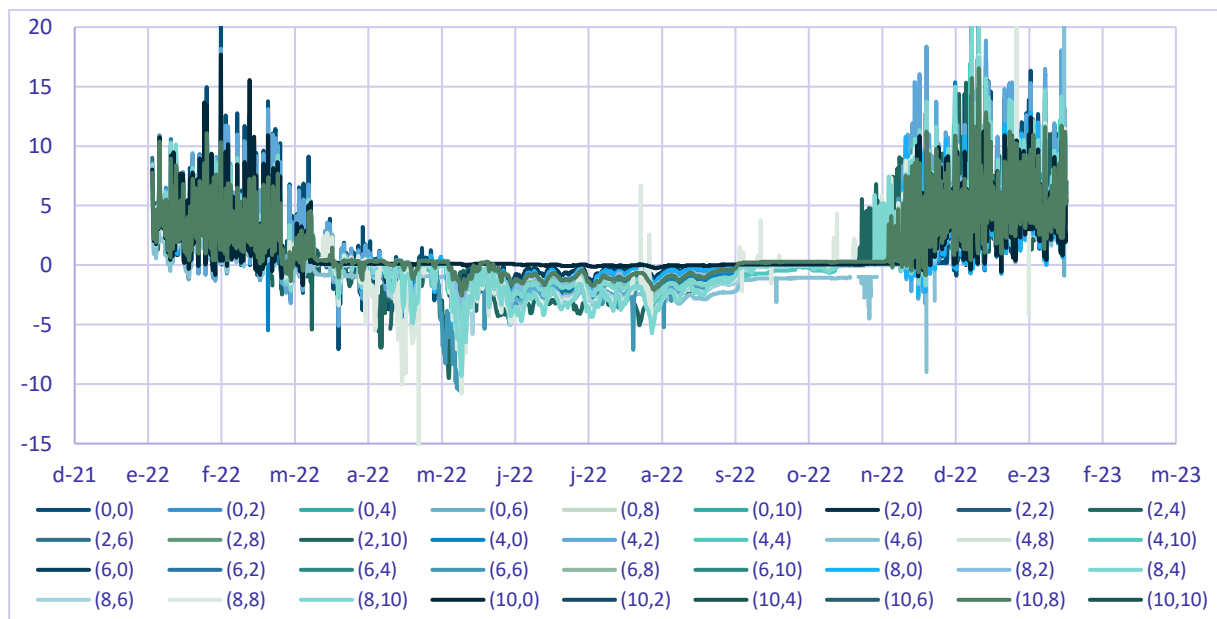


Figura 11: Temperatura superficial (en °C) distribuida por los nodos pares de la malla CALM Limnopolar Lake de la isla Livingston, medida entre enero de 2021 y enero de 2022.

Espesor de cubierta nival distribuida

Los termonivómetros situados en los emplazamientos CALM, disponen de una mayor cantidad de sensores (15) que los instalados en las estaciones PT (7), con el fin de permitir obtener el espesor de la cubierta nival con mayor precisión. Además, al estar distribuidos por la malla CALM, permiten estudiar la variabilidad local y el análisis comparativo con los datos de espesor de capa activa (Fig. 9), de temperatura superficial (Fig. 11), o del TTOP (Fig. 10) en la malla. En enero de 2021 no se instalaron sensores en estos instrumentos en el CALM Crater Lake, pero sí en los del CALM Limnopolar Lake por lo que se dispone de datos del año 2022 para ese emplazamiento.

Los datos disponibles (Fig. 12) muestran un comportamiento muy similar a los de los termonivómetros de las estaciones PT (Fig. 6), pero al existir una menor distancia entre los sensores, es más fácil apreciar el cambio de la variabilidad térmica a distintas alturas a medida que paulatinamente va aumentando el espesor de la cubierta de nieve. Este alcanza un máximo de unos 70 cm de espesor, llegando la cubierta de nieve permanente a mediados de abril y desapareciendo a mediados de noviembre. La variabilidad en las fechas de desaparición de la nieve dentro de la malla CALM es de varias semanas, aunque menos días que la registrada en años anteriores.

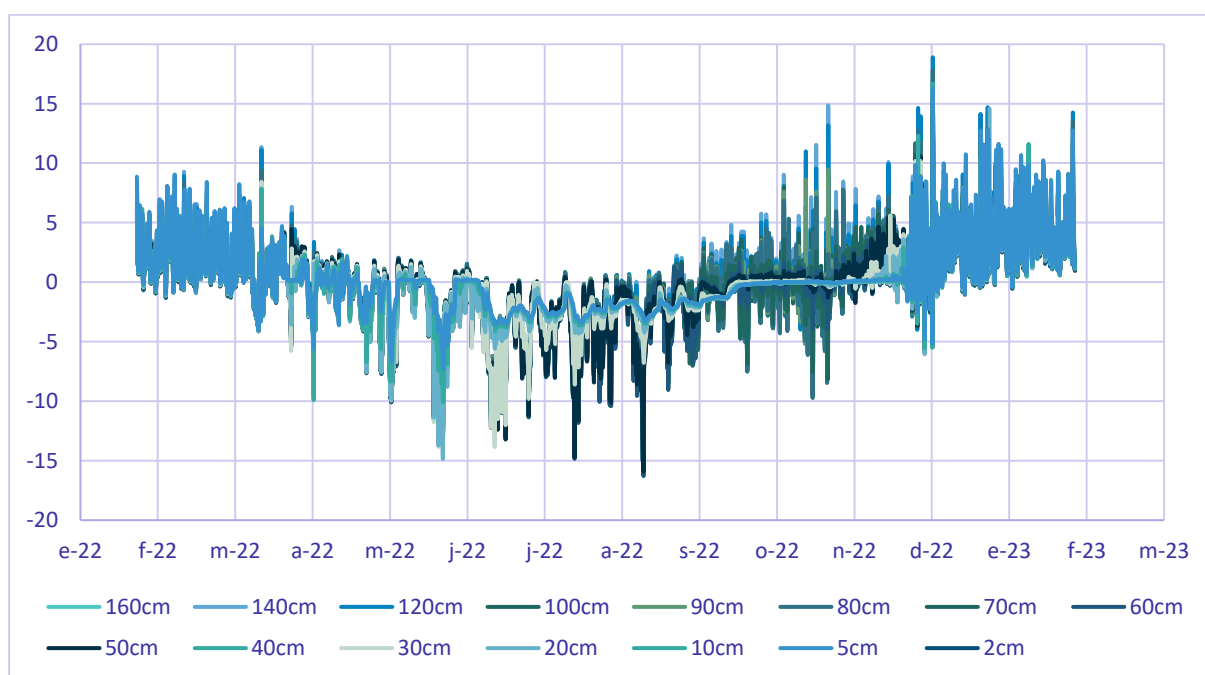


Figura 12: Ejemplo de temperaturas del aire (en °C) a distintas alturas sobre el suelo registradas por los sensores de un termonivómetro de alta resolución de entre los situados en la malla CALM Limnopolar Lake en isla Livingston, utilizados para el estudio del espesor de nieve distribuida por dicha malla.

Parámetros nivométricos

El vuelco de la estación nivométrica en el año 2020 han acabado pasando factura a la estación, pues parece que la batería ha dejado de estar operativa gran parte del año 2022. Los últimos datos continuos fueron tomados en marzo de 2022, y cuando la estación fue revisada el 9 de marzo se encontraba completamente fuera de servicio. Tras realizar un cambio de batería esta volvió a funcionar sin novedad, por lo que la batería debió de verse dañada durante aquel incidente. Aunque los sensores no se han dañado, sí que hay una importante pérdida de los datos, con ausencia de datos entre marzo y noviembre de 2022, y luego en diciembre de 2022 y de enero a marzo de 2023. A pesar de esta importante falta de datos durante todo el invierno, es posible analizar el otoño.

Así, los datos de temperatura del aire (Fig. 13) son similares a los medidos en la zona de Crater Lake por los sensores de las estaciones PT (Fig. 5), y la humedad del aire se mantuvo entre valores del 60 y el 100 %, bajando solo puntualmente a valores de hasta el 50 %. Por otra parte, las temperaturas más bajas del otoño se registraron a principios de mayo, de unos $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. No se dispone de datos relevantes del resto del año, aunque cabe destacar que durante el mes de noviembre las temperaturas ya eran superiores a los $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, y alcanzándose temperaturas de hasta $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en enero de 2023.

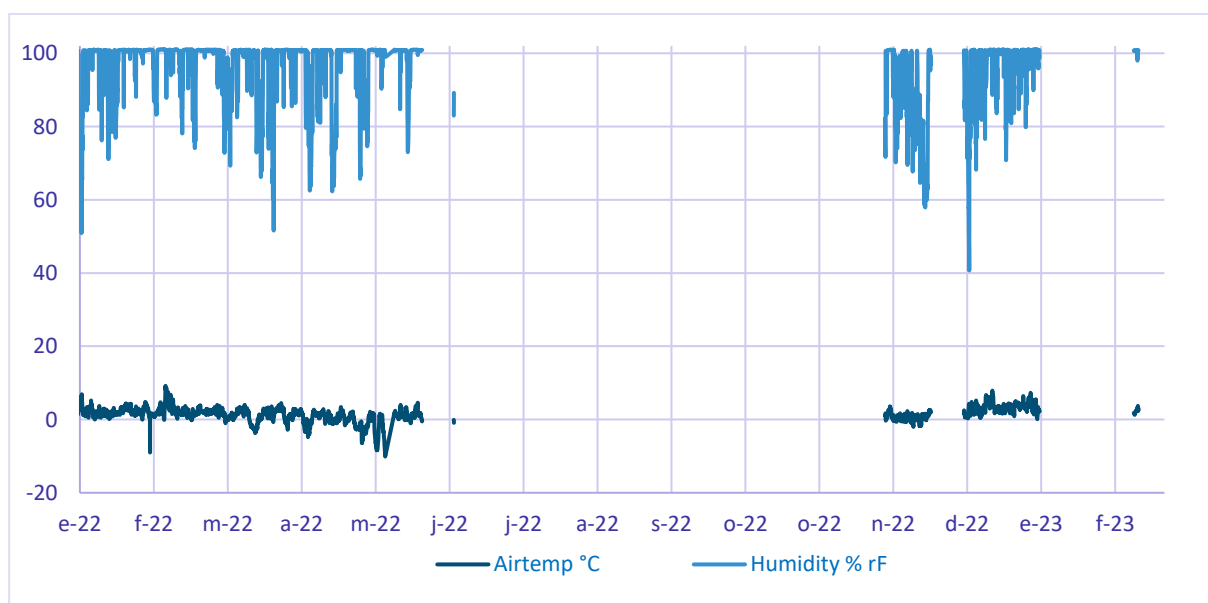


Figura 13: Datos de temperatura (en $^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa del aire (en %) registrados en la estación nivométrica a lo largo del año 2022 y principios de 2023 en isla Decepción.

Por otro lado, los datos de radiación total e infrarroja, tanto incidente como reflejada (Fig. 14), muestra el comportamiento típico a lo largo del año relacionado con más horas de luz en el verano austral, que se va reduciendo a medida que se acerca el invierno, si bien no se dispone de datos de dicho periodo. En noviembre, cuando se recupera la toma de datos, se puede observar la ausencia de nieve en el emplazamiento, tal y como reflejan los datos del piranómetro. En este mismo sensor se puede observar nevadas importantes en febrero y marzo, antes de la llegada de las nevadas importantes del otoño. Destaca que los valores totales se mantienen inferiores a los del año anterior en fechas similares, posiblemente a una mayor existencia de nubosidad en la zona que deberá ser contrastado con las imágenes de las cámaras fenomenológicas.

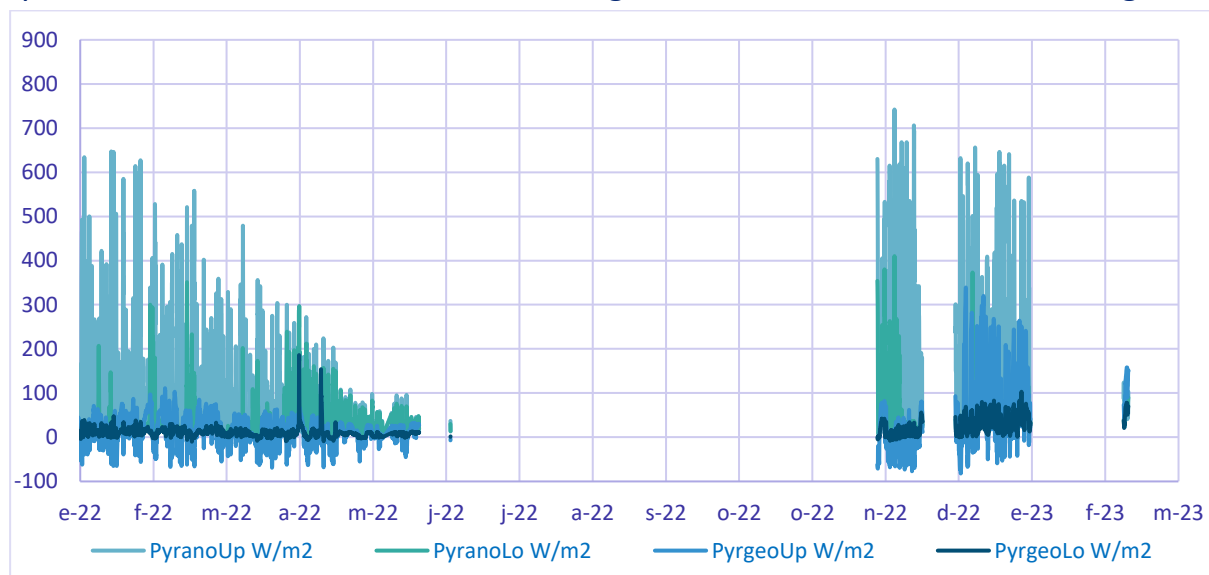


Figura 14: Datos de radiación solar incidente y reflejada (en W/m^2) medidos por los sensores piranómetro y pirgeómetro instalados en la estación nivométrica.

Los datos de temperatura del suelo y de la nieve (Fig. 15) muestran un comportamiento similar al registrado en los sensores de los termónivómetros (Figs. 6 y 12), si bien la falta de datos empezado el otoño no permite establecer el espesor aproximado de la cubierta de nieve, y tan solo confirmar la llegada de las nieves en abril, y su desaparición a principios de noviembre, tal y como muestra el sensor de la temperatura de la superficie. De esta forma se puede constatar que la llegada de la cubierta nival permanente es algo más tardía que el año 2021, y su retirada más temprana.

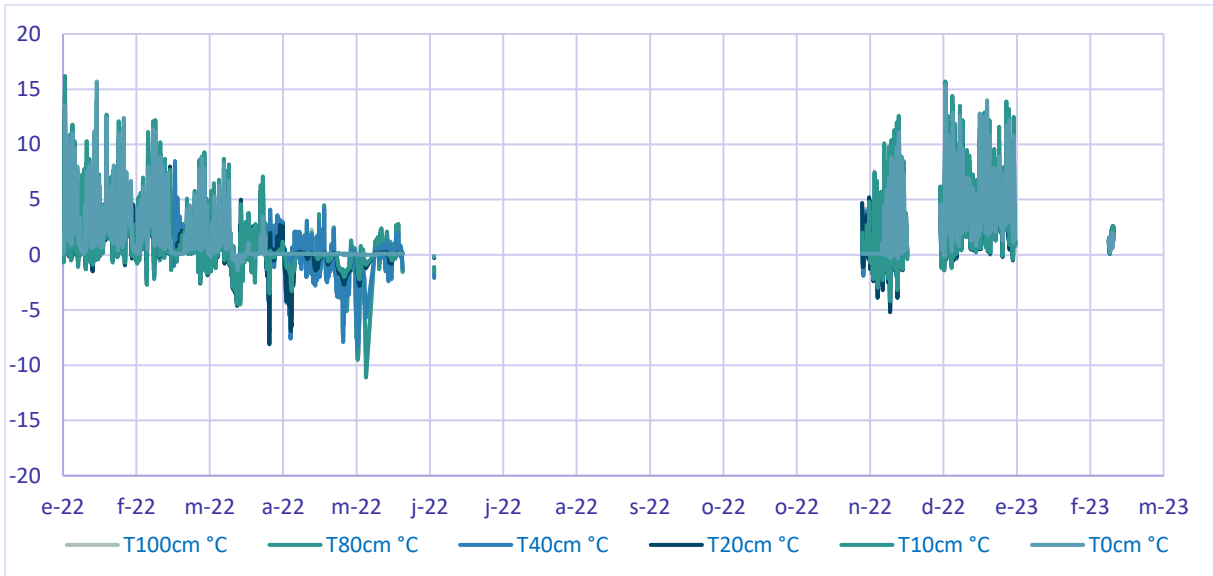


Figura 15: Temperatura del suelo y temperatura de la nieve (en °C) en los sensores instalados a distinta altura sobre el suelo (en cm) en la estación nivométrica en el CALM Crater Lake, isla Decepción.

Los sensores para la obtención de parámetros de la nieve funcionaron perfectamente, aunque con las mencionadas interrupciones generales de la estación nivométrica. Los escasos datos de equivalencia en agua del paquete de nieve (Fig. 16) muestran de forma clara el incremento de la equivalencia en agua de la capa de nieve acumulada en cuanto ésta comienza a aumentar su espesor desde finales de marzo. Incluso es posible observar el efecto de las nevadas menores del verano. Los valores máximos alcanzados en el corto registro disponible superan los 3500 mm, más que el valor de 3000 mm alcanzado durante el invierno de 2021, pero no hay datos disponibles de dicho periodo en el año 2022.

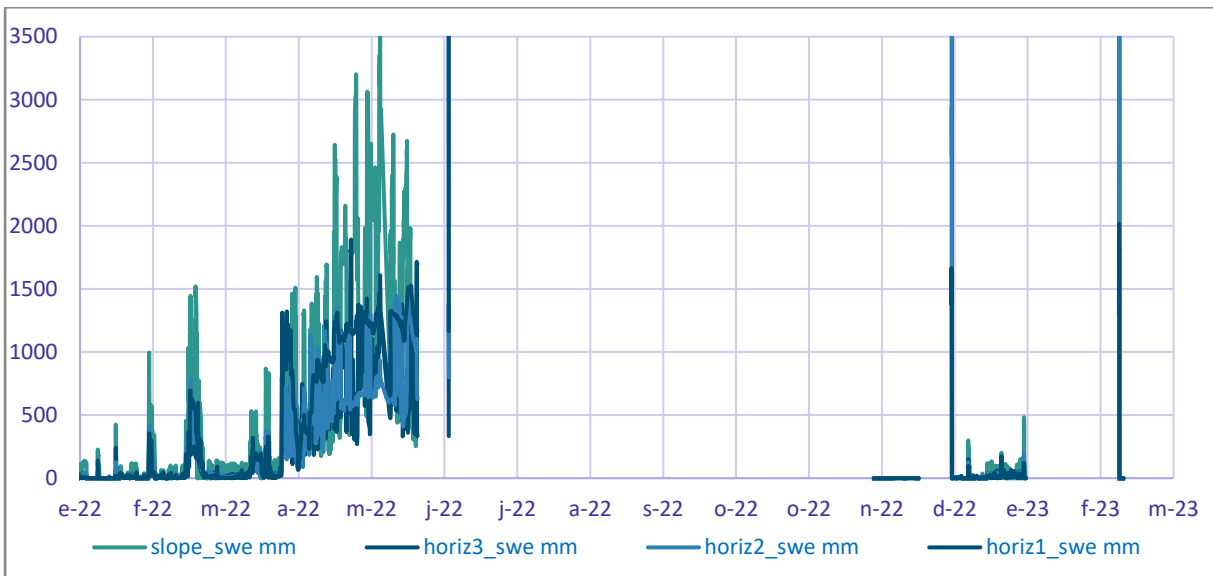


Figura 16: Medidas de equivalente en agua (SWE, en mm) de la nieve medidos en 2022 a distintas alturas sobre el terreno.

Los datos de densidad de la nieve medidos por la estación nivométrica, aunque con mucho más ruido que los anteriores, lo que requiere su tratamiento previo al análisis definitivo, muestran cómo, de forma general, la mayor densidad se alcanza en las zonas profundas del manto de nieve, alcanzándose valores en torno a los 350 kg/m³ a 10 cm de altura sobre el suelo tras las primeras nevadas permanente en el mes de abril (Fig. 17).

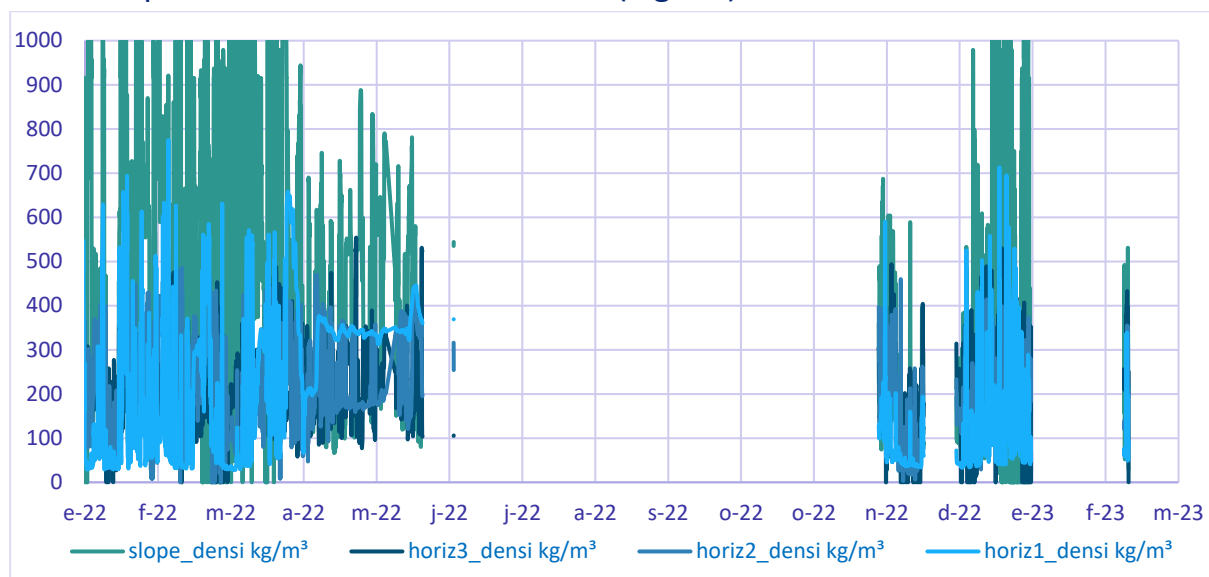


Figura 17: Densidad del manto de nieve (en kg/m³) medido a distintas alturas en isla Decepción durante el año 2022.

Los datos de contenido en hielo (Fig. 18) y en agua (Fig. 19) del paquete de nieve (que también requieren un tratamiento previo para eliminar el ruido) muestran las variaciones en las condiciones de dicho manto de nieve, destacando claramente como a medida que se acumulan las primeras nieves, el contenido en hielo (Fig. 18) va aumentando de forma significativa, mientras que el contenido en agua lo hace de forma mucho más reducida (Fig. 19).

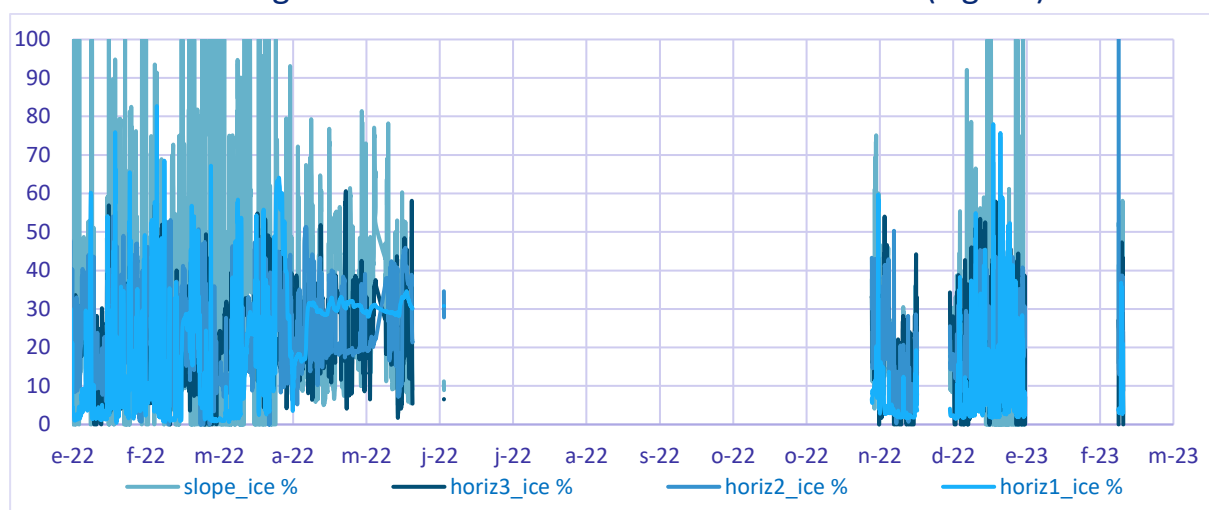


Figura 18: Contenido en hielo del manto de nieve (en %) registrado a distintas alturas por la estación nivométrica en isla Decepción en el año 2022.

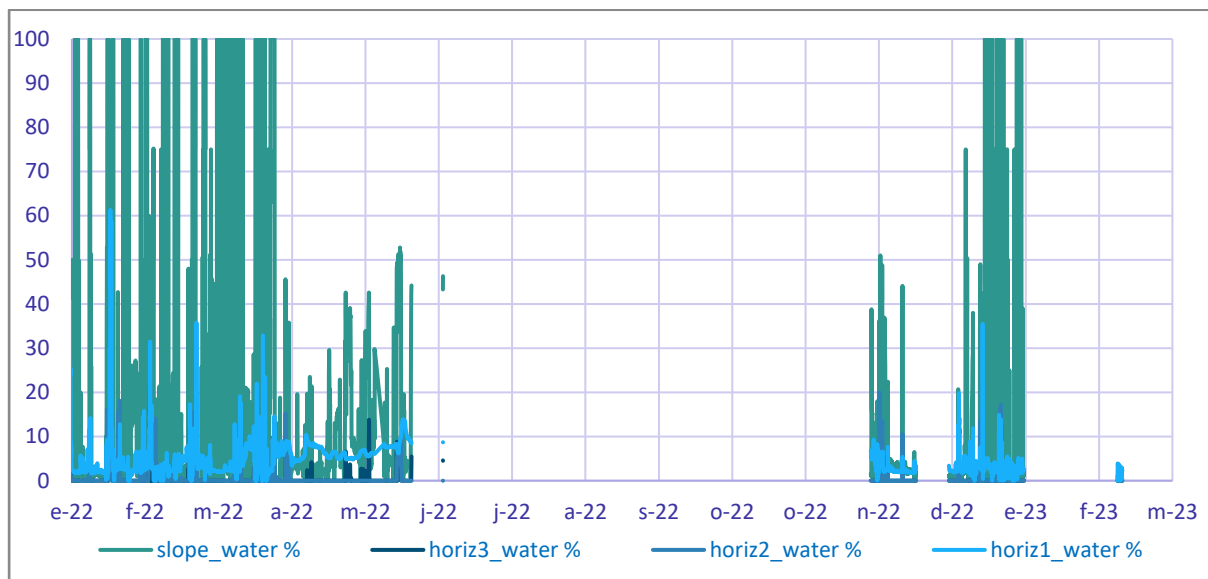


Figura 19: Contenido en agua (en %) del manto de nieve a distintas alturas registrado a lo largo del año 2021 en la zona de estudio en isla Decepción.

Por otro lado, la balanza de nieve fue capaz de detectar el incremento el peso de la nieve a medida que aumentaba el espesor a finales de marzo (Fig. 20). También es posible determinar el final de la cubierta nival a principios de noviembre, si bien esto ya no es detectado por la balanza de nieve, debido a que se encuentra a unos metros de distancia uno del otro. Al no haberse registrado datos durante el invierno, no se dispone de datos de espesor ni densidad máximos alcanzado durante el año 2022. En todo caso, se puede comprobar el buen funcionamiento de estos instrumentos ya que la detección y desaparición de la cubierta de nieve es registrada con precisión por ambos (Fig. 20).

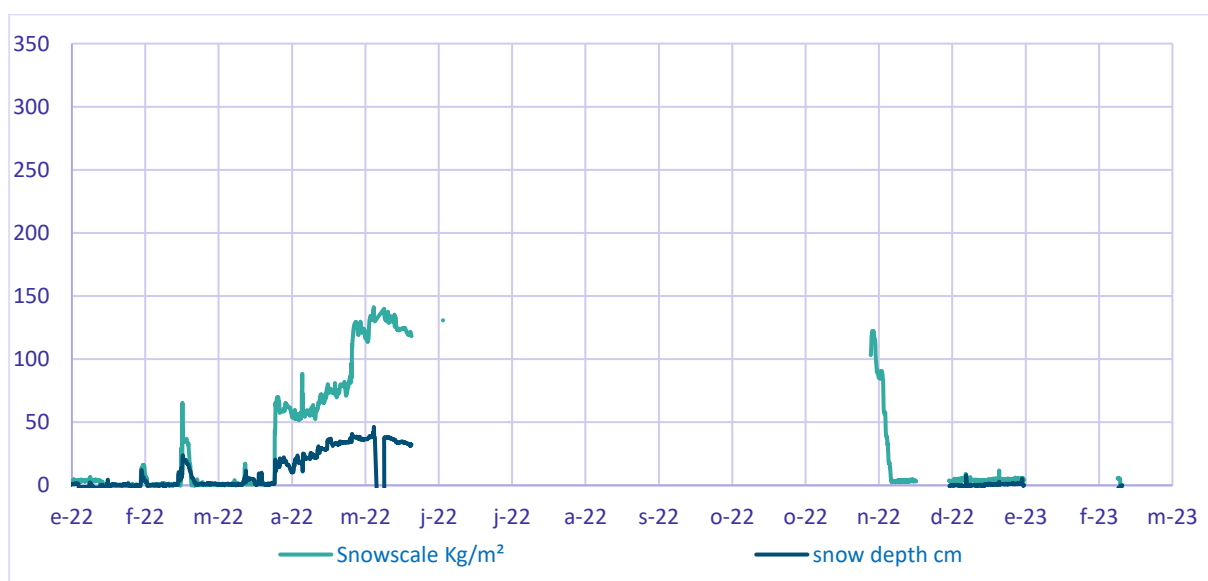


Figura 20: Datos de espesor (cm) y peso (kg/m²) de la cubierta nival registrado por la estación nivométrica mostrando los cortes debidos a la pérdida de energía a lo largo de 2022.

Imágenes fenomenológicas

De las 3 cámaras fenomenológicas que han estado instaladas en el entorno de los sitios CALM en las islas Livingston y Decepción durante el año 2022, ninguna de ellas ha presentado problemas, ni de las propias cámaras, ni de la infraestructura de alimentación ni soporte, por lo que sus imágenes (Fig. 21) permiten estudiar la evolución de las condiciones y fenómenos meteorológicos día a día, sin interrupción.

El uso de estas imágenes permite observar la evolución de la cubierta de nieve a lo largo del año determinando que, aunque se han producido importantes nevadas en el otoño austral entre marzo y mayo, no es hasta mediados de junio cuando se acumula una capa de nieve que, excepto en algunos puntos, ya no se retira de forma paulatina hasta el final del invierno, a principios de diciembre. En concreto, el 20 de diciembre quedarían ya libres de nieve todos los termónivómetros instalados en la zona del CALM Limnopolar Lake, y el 8 de diciembre en la zona del CALM Crater Lake (Fig. 6). En este último, la estación nivométrica quedaría completamente libre de nieve el 7 de diciembre, de acuerdo con las imágenes, si bien los datos de ésta registran la pérdida de manto de nieve algunos días antes (Fig. 20).

Aunque se toman 3 fotografías cada día a las 14, 15 y 16h GMT, correspondientes a las horas centrales del día solar, no siempre es posible ver el terreno debido a la presencia de hielo en la lente, debido a las fuertes tormentas de nieve del invierno antártico, en ambos emplazamientos. Aunque en estos casos no es posible observar el terreno, si lo es conocer el tipo de condiciones ambientales que se dan en esos días. En el año 2022 se han detectado muchos más días que en 2021 en los que las lentes han estado cubiertas de nieve, relacionado con una mayor incidencia de las tormentas de nieve.

Por otro lado, y aunque no es objeto de investigación de estas estaciones, es posible observar en las fotos de la cámara de Crater Lake, el estado de Puerto Foster y su caleta Balleneros, detectándose la formación de algunos fragmentos de hielo superficial marino y su posterior desaparición entre junio y agosto, lo que permite entender las condiciones también del mar más próximo a la zona de estudio.

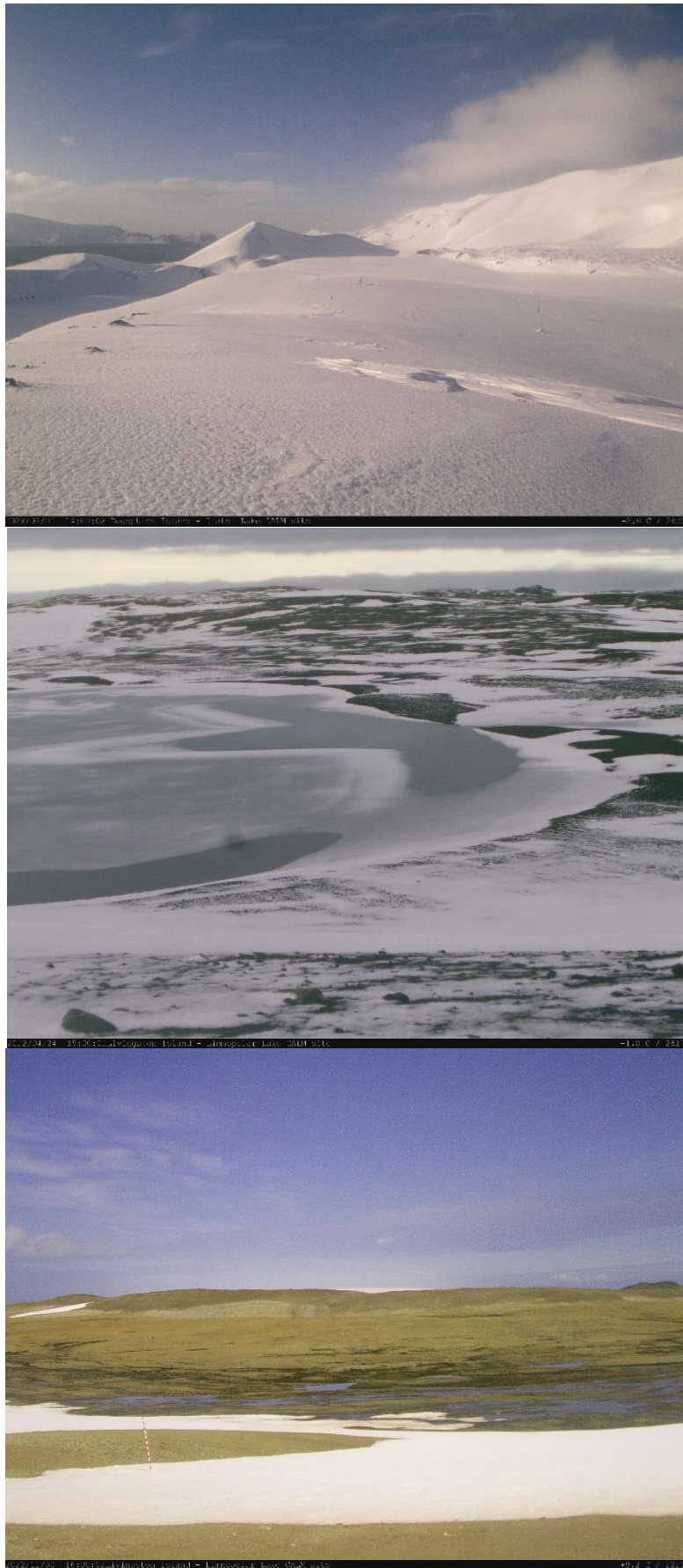


Figura 21: Imágenes tomadas por las cámaras fenomenológicas instaladas en la zona del CALM Crater Lake en isla Decepción (arriba) y en el CALM Limnopolar Lake en península Byers de isla Livingston (en medio y abajo).

Otros datos

Además de los datos tomados en las estaciones PT (temperatura del aire, de la nieve, del suelo y del terreno), de las estaciones CALM (espesor de la capa activa, temperatura superficial distribuida y espesor de nieve distribuida), y de los instrumentos adicionales (estación nivométrica y cámaras fenomenológicas), durante la campaña antártica se ha realizado la toma de una serie de datos adicionales con el fin de apoyar la interpretación de los anteriores. Estos datos se han tomado en la medida de lo posible tanto en el CALM Crater Lake, en isla Decepción, como en el CALM Limnopolar Lake en isla Livingston.

- **Contenido volumétrico de agua:** medido con el dispositivo de *Campbell Scientific Hydrosense II* y un sensor *CS659* de 12 cm, se tomaron datos en una selección de nodos de la malla CALM Crater Lake (Fig. 22) con el fin de, a posteriori, correlacionar los datos de espesor de la capa activa (Fig. 9) y de temperatura superficial medida en los nodos (Fig. 11) y de temperatura en el infrarrojo (Fig. 23). La localización de los nodos, además de con las coordenadas relativas de los mismos, se realizó con el GPS integrado en el dispositivo, aunque únicamente como referencia. Los datos muestran valores de entre 0 y 15%, muy similar al rango observado en el año anterior. El patrón de distribución de las zonas con mayor contenido en agua en la superficie tiene también el mismo patrón, por lo que su distribución debe tener relación con las características del terreno.

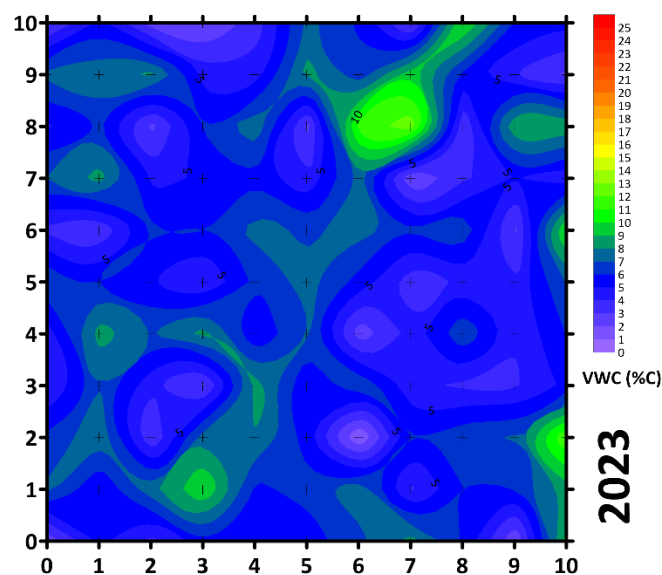


Figura 22: Contenido volumétrico en agua (%) medido en el CALM de Cráter Lake en febrero de 2021.

- **Temperatura superficial por infrarrojos:** medido con un dispositivo *IR thermometer Fluke 62 mini*, se tomaron datos de temperatura de la superficie en una selección de nodos, para correlacionar a posteriori con los datos de espesor de la capa activa (Fig. 9), la temperatura superficial distribuida. La localización de los puntos medidos se realizó con coordenadas relativas de la malla CALM. Cabe destacar, no solo que las temperaturas son mucho más bajas que las registradas en años anteriores (debido a las condiciones ambientales del día concreto de medida), sino el marcado patrón espacial, con un bandeo muy marcado a lo largo del eje X, que no oculta un segundo patrón en paralelo al eje Y, y que de nuevo no está relacionado con un error sistemático, pues estos datos se han ido tomando a lo largo del eje X.

Los puntos con temperaturas más bajas están relacionados con la presencia de nieve en el momento de la toma de los datos, y/o presencia de suelos congelados hasta la superficie debido a la muy reciente desaparición de esta capa de hielo. Para eliminar este efecto, se podrían blanquear esos datos, de tal manera que quedara más marcado el patrón de distribución de temperaturas a lo largo del eje Y, que se intuye en la cartografía (Fig. 23) y que es similar a la observada en los años anteriores. Ese patrón, podría estar relacionado con la presencia de fracturas en la zona, variaciones en la topografía o en cómo la capa de nieve se retira. Para ello es de gran importancia la comparativa con las imágenes de las cámaras fenomenológicas (Fig. 21).

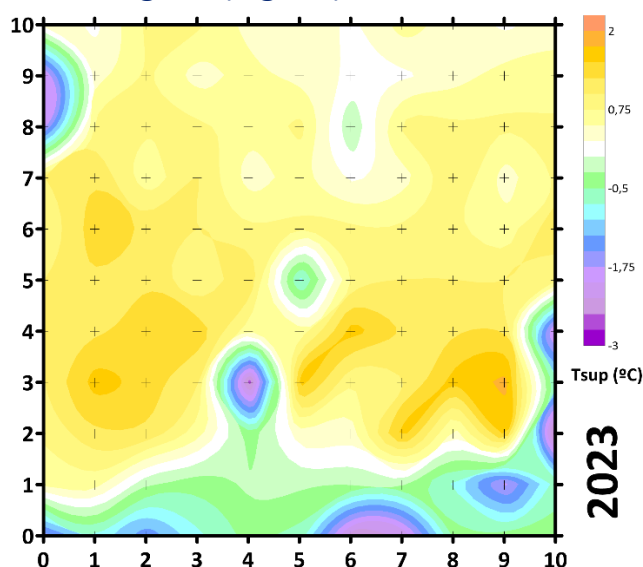


Figura 23: Temperatura superficial por infrarrojos medida en marzo de 2023 en los nodos de la malla CALM Crater Lake en isla Decepción, Antártida.

Planes de futuro

Mantenimiento de las estaciones

Tras la realización de la campaña 2022-23, se prevén las siguientes necesidades de mantenimiento en las estaciones PT y CALM:

Limnopolar Lake:

- Retirada de la infraestructura de la antigua cámara fotográfica automática CC640 ya no existente.
- Reinstalar las piquetas que delimitan el perímetro del sitio CALM, midiendo las diferencias de distancia.

Domo:

- Reposición de mástil por mástiles metálicos
- Instalación de sensor de espesor de nieve.

Nuevo incinerador:

- Perforación de un sondeo alternativo al ya existente, con evidencias de tener agua en su interior. Alternativamente, drenar el agua e intentar sellar el sondeo en su base

Glaciar:

- Revisión o retirar la electrónica de la estación registradora de datos.
- Revisar el estado del sondeo para establecer si existe hielo en su interior tras varios años sin acceso al mismo.
- Sustitución de la cadena nivométrica *Geoprecision*
- Instalación del sensor de temperatura de la superficie *Geoprecision*

Crater Lake:

- Desmantelar el mástil de la antigua cámara 2
- Reemplazar el mástil de la cámara fotográfica automática 1
- Reinstalar sensores de temperatura de superficie distribuido
- Reinstalar sensores de termónivómetros de alta resolución

De forma general, se plantea realizar un equipamiento básico de mantenimiento de estaciones que incluya: antena de comunicaciones, software FG2_Shell, pilas de repuesto, Instrucciones de mantenimiento y repuestos de los distintos modelos de los dispositivos *Geoprecision* M-Log5W (Cable, String, Tilt y SnowBox).

Plan de mejora

Una vez bien avanzado el plan de mejora establecido, con el cambio de tipo de dispositivos registradores de temperatura en las medidas de temperatura del aire, del suelo y del terreno en los sondeos, además de la medida de la temperatura del techo del permafrost, y del espesor de la nieve, quedan pendientes los siguientes experimentos, por orden de prioridad:

- Nivómetros de estaciones sin ellos
- Nivómetros distribuidos en sitios CALM
- Temperatura superficial distribuida en sitios CALM
- Nuevos emplazamientos para el movimiento de la capa activa

Por cuestiones presupuestarias, no podrán abordarse todas estas mejoras en una sola campaña. Los nivómetros que quedan pendientes podrían instalarse en la siguiente campaña mediante el uso de dispositivos M-Log5W-SnowBox de *Geoprecision GmbH*, al igual que los nivómetros distribuidos por los sitios CALM.

Para la medida de la temperatura de la superficie del suelo distribuida por los nodos pares de cada malla CALM, se plantea el uso de 36 dispositivos M-Log5W-Cable por cada sitio CALM, marcado con una estaca, ya que, aunque se requiere más tiempo para la descarga de datos y sus postprocesado, su instalación es más sencilla y con menor impacto que si se realizara únicamente con la instalación de 6 dispositivos M-Log5W-String, con 100 m de cable y 11 sensores cada uno.

En el último caso, también se plantea el uso de dispositivos *Geoprecision*, modelo M-Log5W-Tilt, como los empleados en las dos instalaciones en pruebas realizadas este año. Este tipo de experimento, de momento, no tiene sentido ser instalado en todas las estaciones, ya que en aquellos lugares con roca o sin indicadores de procesos de congelación-descongelación claros, los resultados serían mínimos.

Por otro lado, se plantean nuevos retos y medidas a tomar, como puede ser la humedad del terreno, empleando para ello los sensores específicos de la empresa *EMS-BRNO* instalados este año en algunas de ellas, o bien solicitar el desarrollo de un tipo similar de sensores asociados a dispositivos inalámbrico de *Geoprecision*. Finalmente, se plantean otras opciones, como el inicio de las medidas del flujo térmico mediante sensores HFP01SC, también asociado a dispositivos *Geoprecision*, que simplifique la toma de datos en campo.

Agradecimientos

El seguimiento del comportamiento térmico de los suelos congelados y de los parámetros ambientales relacionados en las islas Livingston y Decepción de las Shetland del Sur, Antártida, no sería posible sin la financiación, inicialmente, del Programa Polar Español a través de la financiación de proyectos de investigación del plan nacional de I+D+I, y desde el año 2015 del Comité Polar Español a través, para esta campaña, de un contrato Art. 60 de la LOSU 2/2023 de 22 de marzo, con la Universidad de Alcalá.

La compleja organización logística de las campañas a desarrolla la Unidad de Tecnología Marina del Consejo Superior de Investigaciones Científicas del Ministerio de Ciencia e Innovación, con la participación de Ejército y Armada del Ministerio de Defensa. El apoyo de las dotaciones de los buques que participan en las campañas (en esta ocasión el BIO Hespérides y el B/O Sarmiento de Gamboa), así como de las Bases Antárticas Española Juan Carlos I en la isla Livingston y Gabriel de Castilla en Isla Decepción, es también fundamental para los movimientos hacia la Antártida o entre las islas, así como para el desarrollo de las tareas de mantenimiento de las estaciones de la red PERMATHERMAL. Cabe destacar el papel de los técnicos y dotaciones de las bases sin cuyo apoyo no sería posible en muchas ocasiones desarrollar el mantenimiento de las estaciones PT y sus instrumentos para que puedan seguir operativos manteniendo la continuidad de la toma de datos para esta serie temporal.

Además, estas estaciones se han ido instalando y manteniendo a lo largo de los años, por un amplio grupo de investigadores de la Universidad de Alcalá, sin cuyo apoyo habría resultado complicado o imposible iniciar mantener esta serie histórica: Miguel Ramos, Miguel Ángel Hidalgo Moreno, Juan José Blanco Ávalos, David Tomé, Antonio Molina Jurado, Cayetana Recio Blitz, Manuel Prieto Mateo, y Sebastián Sánchez Prieto, así como a los colaboradores de la Universidad de Lisboa: Gonçalo Vieira, Vanessa Batista, Gabriel Goyanes, Vasco de Pina, Alice Rivera, y Ana Salomé.

Finalmente, nuestro agradecimiento a los compañeros científicos de otros proyectos de investigación y series temporales por su ayuda y apoyo durante las campañas antárticas, y su amistad, labrada tras muchas campañas antárticas compartiendo la dureza y belleza del trabajo de campo en territorio antártico. Este año nuestro agradecimiento específico es para los colegas del programa polar portugués Joana Baptista, Vasco Miranda, Henrique Zilhão y Catarina Louro, por la toma de datos auxiliar realizada en el CALM Crater Lake a mediados de campaña.

Referencias

- de Pablo, M.A. 2021. Maintenance of PT and CALM stations for permafrost and active layer monitoring on Livingston and Deception Islands, Antarctica. 2020-21 campaign report (in Spanish). ACMA-Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España. 52 pp. DOI: 10.5281/zenodo.5020140
- de Pablo, M.A. and Jafarov, 2017. Ground temperatures modeling at the Limnopolar Lake CALM-S site: initial approach. En: Ruiz-Fernández, J., García-Hernández, C., Oliva, M., Rodríguez-Pérez, C., Gallinar, D. (Eds.) *Ambientes periglaciares: avances en su estudio, valoración patrimonial y riesgos asociados* Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, Oviedo, p.180.
- de Pablo, M.A., Jiménez, J.J., Ramos, M., Prieto, M., Molina, A., Vieira, G., Hidalgo, M.A., Fernández, S., Recondo, C., Calleja, J.F., Peón, J.J., Corbea-Pérez, A., Maior, C.N., Morales, M., Mora, C. 2020. Frozen ground and snow cover monitoring in Livingston and Deception islands, Antarctica: preliminary results of the 2015-2019 PERMASNOW project. *Geographical Research Letters*, 46(1). 187-222.
- de Pablo, M.A., Molina, A., Recio, C., Ramos, M., Goyanes, G., Ropero, M.A. 2017. Análisis del estado de la capa activa en el emplazamiento de la base antártica española Gabriel de Castilla, Isla Decepción, Antártida. *Boletín geológico y minero*, 128(1). 69-92.
- de Pablo, M.A., Ramos, M., Molina, A., Vieira, G., Hidalgo, M., Prieto, M., Jiménez, J., Fernández, S., Recondo, C., Calleja, J., Peón, J., and Mora, C. 2016. Frozen ground and snow cover monitoring in the South Shetland Islands, Antarctica: Instrumentation, effects on ground thermal behavior and future research. *Geographical Research Letters*, 42(2), 475-495.
- de Pablo, M.A., Ramos, M., Vieira, G., and Quesada, A. 2010. A new CALM-S site on Byers Peninsula, Livingston Island, Antarctica. En: Blanco, J.J., de Pablo, M.A., y Ramos, M. (Coord.) *Ambientes periglaciares, permafrost y variabilidad climática*. 155-161.
- de Pablo, M.A., Ramos, M., Vieira, G., Molina, A., Ramos, R., Maior, C.N. 2022. PERMATHERMAL 2000-2021: two decades monitoring permafrost and active layer in Livingston and Deception islands, South Shetland Archipelago, Antarctica. Abstracts of the 10th Spanish-Portuguese Assembly of Geodesy and Geophysics - Toledo, November 2022.

- de Pablo, M.A., Ramos, M., Vieira, G., Molina, A., Ramos, R., Maior, C.N., Prieto, M., and Ruiz-Fernández, J. 2023. Interannual variability of ground surface thermal regimes in Livingston and Deception islands, Antarctica (2007-2021). *Land Degradation and Development*, (enviado).
- Gallego, M.J., 2017. Régimen térmico y cubierta nival en el permafrost de isla Decepción, Shetlands del Sur, Antártida marítima. *Trabajo Final de Máster. Universidad de Oviedo*. 39pp.
- Gruber, S., 2019. Ground subsidence and heave over permafrost: hourly time series reveal interannual, seasonal and shorter-term movement caused by freezing, thawing and water movement. *The Cryosphere*, 14(4). 1437-1447.
- Guglielmin, M., 2006. Ground surface temperature (GST), active layer, and permafrost monitoring in continental Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes*, 17, 133–143.
- Harris, C., Haeberli, W., Muhll, D.V., and King, L. 2001. Permafrost monitoring in the high mountains of Europe: the PACE project in its global context. *Permafrost Periglac. Process*, 12. 3–11. DOI: 10.1002/ppp 377
- Hrbáček, F., Engel, Z., Kňázková, M., & Smolíková, J. (2021). Effect of summer snow cover on the active layer thermal regime and thickness on CALM-S JGM site, James Ross Island, eastern Antarctic Peninsula. *Catena*, 207, 105608.
- Lundquist, J. D., and F. Lott (2008), Using inexpensive temperature sensors to monitor the duration and heterogeneity of snow-covered areas. *Water Resour. Res.*, 44, W00D16.
- Lewkowicz, A.G. 2008. Evaluation of miniature temperature-loggers to monitor snowpack evolution at mountain permafrost sites, northwestern Canada. *Permafrost and Periglacial Processes* 19, 323-331.
- Ramos, M. 1995. Automatic device to measure the active permafrost layer near the Spanish Antarctic Station. *Terra Antarctica*, 2(1). 61-63.
- Ramos, M. 1997. Topographic distribution of Short-wave radiation in the vicinity of Spanish Antarctic Research Station. *Terra Antarctica*, 4(1). 5-10.
- Ramos, M. 1998. The active layer in the vicinity of the Spanish Antarctic Station. *Terra Antarctica*, 5(2). 189-193.
- Ramos, M. y Vieira, G. 2001. Active layer and permafrost monitoring in Livingston Island, Antarctic. First results from 2000 to 2001. In: *Proceedings of the 8th Intern. Conf. on Permafrost*. 926-933.
- Ramos, M. y Vieira, G. 2004. Variabilidad térmica de la capa activa y evaluación de la energía perdida por el suelo, durante el proceso de congelación en la

- isla Livingston (Antártida). Inviernos 2000, 2001 y 2002. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Sec. Geol.)*, 99 (1-4). 83-92.
- Ramos, M. y Vieira, G., 2009. Evaluation of the ground surface Enthalpy balance from bedrock temperatures (Livingston Island, Maritime Antarctic). *The Cryosphere*, 3. 133–145.
- Ramos, M., Aguirre-Puente, J., Costard, F., Ozouf, J.C. 1994. Correlation between heat flux on the ground and permafrost thermal regime near the Spanish Antarctic Station. *Ground Freezing*, 94. 395-396.
- Ramos, M., Hasler, A., Vieira, G., Hauck, C., and Gruber, S. 2009. Drilling and Installation of Boreholes for Permafrost Thermal Monitoring on Livingston Island in the Maritime Antarctic. *Permafrost and Periglac. Process.*, 20. 57–64.
- Ramos, M., Vieira, G., Crespo, C., y Bretón, L. 2002. Seguimiento de la evolución temporal del gradiente térmico de capa activa en las proximidades de la B.A.E. Juan Carlos I. En: Serrano, E. y García, A. (Ed.) *Periglaciario en montaña y altas altitudes*. Dpto. Geografía, Universidad de Valladolid. 257-276.
- Ramos, M., Vieira, G., Gruber, S., de Pablo, M., Correia, A. 2010a. Estado térmico del permafrost en el monte Reina Sofía, primer año de registro continuo. Isla Livingston (Antártida). En: Blanco, J.J., de Pablo, M.A., y Ramos, M. (Coord.) *Ambientes periglaciares, permafrost y variabilidad climática*. 79-92.
- Ramos, M., Vieira, G., Guilichinsky, D., y de Pablo, M.A. 2010b. Nuevas estaciones de medida del régimen térmico del permafrost en el área de “Crater Lake”. Isla Decepción (Antártida). Resultados preliminares. En: Blanco, J.J., de Pablo, M.A., y Ramos, M. (Coord.) *Ambientes periglaciares, permafrost y variabilidad climática*. 93-108.
- Streletskiy, D., Noetzli, J., Smith, S.L., Vieira, G., Schoeneich, P., Hrbacek, F. and A.M. Irrgang. 2021. Measurement Standards and Monitoring Guidelines for the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). 2021. DOI: 10.5281/zenodo.6075468
- Streletskiy, D., Noetzli, J., Smith, S.L., Vieira, G., Schoeneich, P., Hrbacek, F. and A.M. Irrgang. 2022. Measurement Recommendations and Guidelines for the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). DOI: 10.5281/zenodo.5973079.
- Outcalt, S.I., Nelson, F.E., Hinkel, K.M. 1990. The zero-curtain effect: heat and mass transfer across an isothermal region in freezing soil. *Water Resources Research*, 26 (7). 1509-1516.

Anexo I: Acrónimos

AERT	<i>Automatic Electrical Resistivity Tomography</i>
AEI	Agencia Estatal de Investigación
BAA	Base Antártica Argentina “Decepción”
BAB	Base Antártica Búlgara “San Clemente de Ohrid”
BAE JCI	Base Antártica Española “Juan Carlos I”
BAE GdC	Base Antártica Española “Gabriel de Castilla”
CALM	<i>Circumpolar Active Layer Monitoring</i>
CB	Campamento Internacional Byers
CNDP	Centro Nacional de Datos Polares
CPE	Comité Polar Español
CSIC	Consejo superior de Investigaciones Científicas
GCOS	<i>Global Climate Observing System</i>
GTN-P	<i>Global Terrestrial Network for Permafrost</i>
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IPA	<i>International Permafrost Association</i>
NSF	<i>National Science Foundation</i>
PT	<i>Permafrost temperature (antes TSP)</i>
TSP	<i>Thermal State of Permafrost</i>
TDR	<i>Time-domain reflectometry</i>
UAH	Universidad de Alcalá
UL	<i>Universidade de Lisboa</i>
UN	<i>United Nations</i>
UTM	Unidad de Tecnología Marina

