

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 2021-22



Universidad
de Alcalá

Miguel Ángel de Pablo Hdez.

Unidad de Geología. Facultad de Ciencias.



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

Fecha de publicación: Abril 2022

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.83 Ley Orgánica 6/2001 de 21 de diciembre (ref. 2022/042 y código 2022/00102/001) que ha tenido por objeto la realización de las actuaciones correspondientes.

Cite este documento como:

de Pablo, M.A. 2022. Maintenance of PT and CALM stations for permafrost and active layer monitoring on Livingston and Deception Islands, Antarctica. 2021-22 campaign report. (in Spanish). ACMA-Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España. 46 pp. DOI: 10.5281/zenodo.6411073.

Foto de portada y contraportada: fotografía de isla Decepción tomada por una de las cámaras fenomenológicas instaladas en el CALM Crater Lake.

Equipo investigador



Redes internacionales



Financiación y logística



CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| Introducción..... | 1 |
| Los comienzos | 1 |
| La estandarización..... | 3 |
| Hacia una nueva época..... | 4 |
| La campaña 2021-22..... | 5 |
| Estaciones | 6 |
| Localización | 6 |
| Parámetros | 7 |
| Mediciones..... | 9 |
| Mantenimiento | 9 |
| Datos..... | 10 |
| Instrumentación..... | 12 |
| Estaciones PT..... | 12 |
| Temperatura del aire | 12 |
| Temperatura de la superficie | 13 |
| Temperatura del terreno | 13 |
| Espesor de nieve..... | 14 |
| Estaciones automáticas | 15 |
| Estaciones CALM | 16 |
| Espesor de la capa activa | 16 |
| Temperatura del techo del permafrost | 17 |
| Temperatura superficial | 17 |
| Espesor de cubierta nival..... | 18 |
| Otros instrumentos | 18 |
| Cámaras fenomenológicas | 18 |
| Estación nivométrica | 20 |
| Campaña antártica 2021-22 | 21 |
| Desarrollo de la campaña | 21 |
| Desarrollo general | 21 |
| Calendario de campaña | 21 |
| Condiciones meteorológicas | 22 |

| | |
|---|----|
| Personal investigador | 22 |
| Desarrollo de las tareas | 23 |
| Consecución de objetivos | 24 |
| El estado de las estaciones | 25 |
| Mantenimientos realizados | 26 |
| Cambios de instrumentación | 27 |
| Retirada de instrumentación | 27 |
| Instalación de nuevos instrumentos | 28 |
| Incidencias | 28 |
| Datos del año 2020 | 29 |
| Generalidades | 29 |
| Disponibilidad de datos | 29 |
| Temperatura del Aire | 33 |
| Temperatura de la nieve | 34 |
| Temperatura de la superficie..... | 35 |
| Temperatura del terreno | 36 |
| Espesor de la capa activa | 37 |
| Temperatura del techo del permafrost..... | 38 |
| Temperatura superficial distribuida | 39 |
| Espesor de cubierta nival distribuida | 40 |
| Parámetros nivométricos | 41 |
| Imágenes fenomenológicas | 46 |
| Otros datos | 48 |
| Planes de futuro..... | 49 |
| Mantenimiento de las estaciones | 49 |
| Plan de mejora | 50 |
| Agradecimientos | 51 |
| Referencias | 52 |
| Anexo I: Acrónimos | 55 |

Introducción

Los comienzos

Las primeras perforaciones para la realización de un seguimiento térmico continuado de la temperatura de los suelos estacional y permanentemente congelados en las Shetland del Sur por parte de nuestro equipo de investigación se realizaron en el año 2000, en las proximidades de la Base Antártica Española Juan Carlos I, en la isla Livingston (Ramos and Vieira, 2003, 2004, 2009). Ésta era una nueva línea de trabajo, pues los primeros estudios por parte de nuestro grupo, llevados a cabo en las islas Livingston y Decepción desde finales de los años 80 por el Catedrático de Física Profesor Dr. Miguel Ramos, de la Universidad de Alcalá, estaban enfocados a la micrometeorología de la capa límite entre la atmósfera y el suelo. 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).

Sin embargo, en ese año 2000 comienza lo que sería el germen de la red PERMATHERMAL de monitorización térmica de los suelos estacional y permanentemente congelados en las islas Livingston y Decepción, mediante la perforación de los citados sondeos 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 primeras perforaciones, se realizaron en la loma Incinerador y 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 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 su propia red de monitorización también en las Shetland del Sur (PERMANTAR). Estas perforaciones fueron posibles gracias a la financiación por parte de 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 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 quedan establecida una red de monitorización de los suelos congelados en las islas Livingston y Decepción, actualmente denominada 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).

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, que pasan a denominarse 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).

Hacia una nueva época

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 14 estaciones PT (anteriormente TSP; [Streletskiy et al., 2021](#)), además de una estación nivométrica, y 4 cámaras fenomenológicas, y algunos otros instrumentos tomando datos en las duras y complejas condiciones antárticas. Esto 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, dando 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) o PERMANTAR-3 (PTDC/AAG-GLO/3908/2012), 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.

Durante todos estos años de vida de las estaciones PERMATHERMAL, se ha constatado que los instrumentos y sensores empleados tienen el problema de que requieren mucho tiempo para el volcado de datos y existen grandes pérdidas de datos debido a los daños que sufren debido a las condiciones ambientales tan duras 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 (prácticamente) completa renovación de la instrumentación de la red, sustituyendo los dispositivos empleados 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. Así, la campaña 2021-22 se convierte en un punto de inflexión en esta red y es el estudio de los suelos congelados en estas islas antárticas.

La campaña 2021-22

En el citado contexto, la campaña 2021-22 para el mantenimiento de las estaciones PT (anteriormente TSP) y CALM de la red PERMATHERMAL es financiada por el Comité Polar Español a través de la Unidad de Tecnología Marina del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 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 establecen que los objetivos de la campaña son los siguientes:

- Volcado de datos del año 2021 de los sensores de las distintas estaciones.
- Programación e instalación de sensores en termómetros y otras medidas secundarias.
- Renovación de la instrumentación para la medida de la temperatura del aire, la superficie y el terreno, en los casos posibles.
- Mantenimiento de los sistemas de soporte y alimentación de energía.
- Mantenimiento de las cámaras fotográficas automáticas y reposición de tarjetas de memoria y reenfoque.
- Toma de datos in situ sobre espesor de la capa activa en la estación de descongelación por medios mecánicos manuales, así como de datos adicionales de las propiedades de los suelos, 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 2021-22 organizada por el Programa Polar Español 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 11 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 (Figura 1). Además, de éstas, existen otras estaciones en isla Decepción, en fase de pruebas (Colina Sísmica, en colaboración con la Universidad de Granada), y para el estudio de los suelos congelados en el emplazamiento de la BAE Gabriel de Castilla.

Tabla 1: Localización de las estaciones TSP en las islas Livingston y Decepción, Antártida (modificado de de Pablo, 2021).

| ESTACIONES PT | LOCALIZACIÓN | ALTITUD | OBSERVACIONES |
|-------------------------|-------------------------------|---------|---------------|
| Isla Livingston: | | | |
| Península Byers: | | | |
| Limnopolare Lake | 62°38'59.100"S 61°06'16.900"W | 75 m | ZAEP nº 126 |
| Domo | 62°37'17.049"S 60°58'32.098"W | 45 m | ZAEP nº 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 | 62°59'06.845"S 60°40'45.225"W | 85 m | |
| Cerro Caliente | 62°58'27.200"S 60°42'38.700"W | 107 m | ZAEP nº 140 |

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: | | | |
| Limnopolare Lake | 62°38'59.100"S 61°06'16.900"W | 75 m | ZAEP nº 126 |
| Isla Decepción: | | | |
| Crater Lake | 62°59'06.845"S 60°40'45.225"W | 85 m | |

PERMATHERMAL

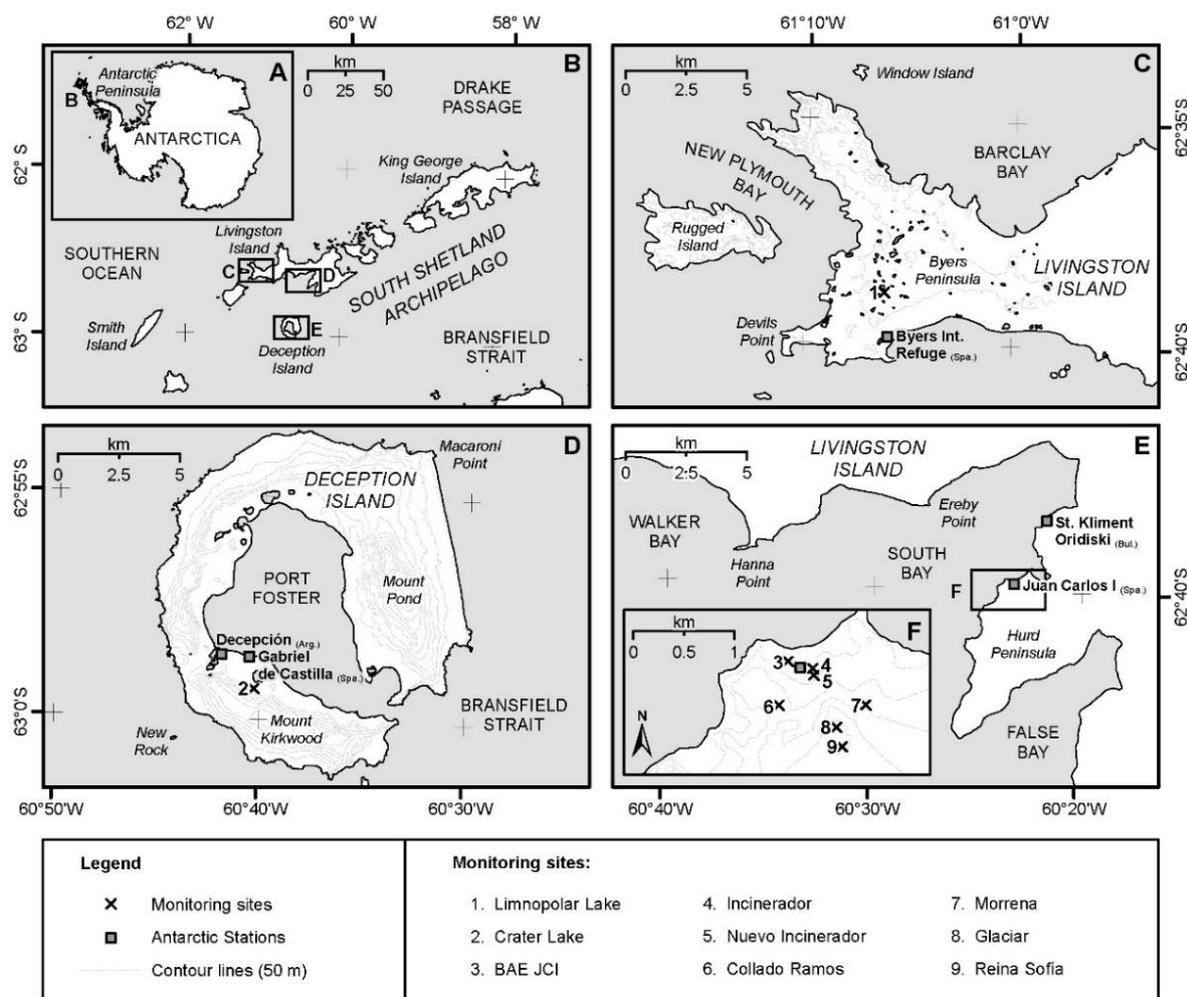


Figura 1: Mapa de localización de las estaciones de monitorización del estado térmico del permafrost y el espesor de la capa activa que constituyen la red PERMATHERMAL situadas en distintos lugares de las islas Livingston y Decepción, Antártida (Tomado de de Pablo et al., 2016).

Parámetros

Cada una de estas estaciones PT cuenta con una serie de instrumentación para la medida de la temperatura de terreno y de parámetros ambientales, mientras que las estaciones CALM se han dotado de instrumentación complementaria que ayuda 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, los sensores utilizados y los procedimientos de medida han ido estandarizándose a lo largo de los años con el fin de mejorar la calidad de la red de datos y permitir extraer la mayor cantidad posible de información, a la vez que la comparativa entre estaciones de medida en este entorno.

Campaña Antártica 2021-22

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; [o] instalado en campaña 2021-22 (Modificado de de Pablo et al., 2020 y de Pablo, 2021).

| LUGAR | ZONA | ESTACIÓN | CÓDIGO | TIPO | INSTRUMENTACIÓN | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------|-----------------|----|-----|----|------|-----|-----|--|
| | | | | | AT | ST | GST | GT | TTOP | TLC | SPA | |
| Isla Deception | Crater Lake | Crater Lake | A16 | CALM-S | X | | X | | X | X | X | |
| | | | CL-S1 | PT | o | X | X | X | | | | |
| | | | CL-S2 | PT | X | X | X | X | | | | |
| | | | CL-S3 | PT | X | X | X | X | | | | |
| | | | CL-S4 | PT | | o | X | | | | | |
| | | | CL-S33 | PT | X | X | X | | | | | |
| | | | CL-S77 | PT | X | X | X | | | | | |
| Isla Livingston | Península Byers | Limnopolar Lake | A25 | CALM-S | | | X | | | | X | |
| | | | LL-S1 | PT | X | X | X | X | | | | |
| | | | LL-S2 | PT | | | | | X | | | |
| | Península Hurd | Domo | BAE-Juan Carlos I | DO | PT | o | | o | | | | |
| | | | | JC | PT | X | X | X | | | | |
| | | | | NI | PT | X | X | X | X | | | |
| | | | | IN | PT | X | X | X | X | | | |
| | | | | CR | PT | X | X | X | X | | | |
| | | | | MO | PT | X | X | X | | | | |
| | | | | GL | PT | o | | | | X | | |
| | | | | SO | PT | X | X | X | X | | | |

En general, las estaciones PT (Tabla 3) 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 con un sensor para la medida de la temperatura de la superficie, para el control del régimen térmico del suelo, parámetro necesario, 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; y (d) un mástil de madera con sensores de temperatura del aire a distinta altura sobre el terreno para aproximar el espesor de nieve.

Las estaciones CALM (Tabla 3), por su parte, pueden tener una serie de medidas 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.

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.

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. Por otro lado, debido al tipo de instrumentos utilizados, en muchos de los casos es requerido borrar la memoria de datos y reprogramar los sensores para que puedan tomar datos durante al menos un año más, hasta la siguiente visita a la zona. Son precisamente este tipo de tareas las que se pretende evitar (o, al menos, reducir), mediante la sustitución de los dispositivos utilizados para la medida de la temperatura del aire, el suelo y el terreno en el interior de los sondeos, quedando únicamente los sensores para medir la temperatura de la nieve, o la temperatura superficial en los sitios CALM.

Finalmente, 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

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_XXXXXX_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 |

De esta forma 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

Los datos de nivel 4 de preprocesado se encuentran listos para su explotación, y son los enviados a la base de datos de GTN-P y CALM. 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.

Instrumentación

Estaciones PT

Las estaciones PT (anteriormente TSP) están, generalmente, dotadas de instrumentos que permiten la medida de temperatura del aire, temperatura de la superficie, y temperatura del suelo a distintas profundidades. Adicionalmente, y con el fin de obtener medidas aproximadas del espesor de nieve, se han dotado de sensores que permiten determinar la temperatura del aire a distintas alturas, 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 cuentan con medios técnicos más avanzados, existiendo, de manera general, una homogeneidad en las estaciones que se ha conseguido a lo largo de los años desde el inicio del establecimiento de estas estaciones.

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 de la sonda 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 $\pm 0,1^\circ\text{C}$ 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 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 20x20cm (y 3 mm de espesor). 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 presente campaña, 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, 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. En el interior de cada perforación se instalan una serie de sensores de temperatura. Hasta la presente campaña 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 encuentran 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 han sustituido 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 mide directamente, sino que se calcula a partir de los datos de temperatura del aire registrados a distintas alturas, aplicando algunos de los distintos métodos existentes para tal fin. 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 termómetros 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.

Estos sensores no han podido ser reemplazados durante la campaña 2021-22 por cuestiones presupuestarias y por el alto coste que tienen, estudiándose actualmente otras opciones de instrumentos para sustituirlos en el futuro.

Estaciones automáticas

En algunos puntos estas estaciones están dotadas de instrumentación más compleja que sustituye a parte de los instrumentos anteriormente descrito. Estas estaciones, alimentadas con una batería y recargada con un panel solar montado sobre un poste, disponen 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 encuentran en el interior de los sondeos perforados y que atraviesan la capa activa y se introducen en el permafrost. En algunos casos, adicionalmente se ha 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 dispone 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 toman 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 han desmantelado estas estaciones dejándose únicamente la de la estación Glaciar con una cadena termométrica conectada, a la espera de poder ser reemplazada por un dispositivo *Geoprecision M-Log5W-String* y su correspondiente sonda termométrica en las siguientes campañas.

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 asa 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. 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 han sido sustituidos 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.

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, 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 TSP, en éstos se cuenta 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 están 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 han perforado unas cavidades que permiten proteger los dispositivos de las inclemencias ambientales, pero seguir en contacto con la atmósfera para registrar su temperatura.

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.

Estas cámaras fueron instaladas para cubrir el área de las estaciones CALM y 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, permiten 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 la campaña 2021-22 se ha realizado el desmontaje de la cámara *CC640* situada en el CALM de Crater Lake (A16), quedando pendiente de desmantelar la situada 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) |

Campaña antártica 2021-22

Desarrollo de la campaña

Desarrollo general

La Campaña Antártica Española 2021-22 se ha desarrollado en un escenario complejo debido a la situación de 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. Aunque superada esta fase, las complicaciones logísticas y de seguridad sanitaria han continuado, afectando especialmente a las fases de tránsito a/desde Antártida a través de territorio de Argentina y Chile, pasando por la realización de pruebas PCR 72 horas antes del inicio del viaje, o la realización de cuarentenas de 10 días en Ushuaia (Argentina), durante el tránsito hacia la Antártida, además de un sinnúmero de medidas menores de seguridad sanitaria y mantenimiento de las distancias sociales.

Lamentablemente en esta campaña también ha surgido un brote de COVID-19 a bordo del BIO Hespérides, que ha complicado las operaciones logísticas de la última parte de la campaña, así como a la suspensión de la actividad de varios proyectos científicos, si bien no ha afectado al desarrollo de la campaña de mantenimiento de las estaciones de la red PERMATHERMAL.

Calendario de campaña

El calendario de la campaña ha resultado más parecido al de las campañas anteriores a la pandemia, con movimientos entre las islas Decepción y Livingston donde se encuentran las estaciones de la red PERMATHERMAL, si bien, con solo un investigador desplazado a zona en lugar de los dos solicitados, y demasiado cortas en la fase de trabajo en Península Byers, con solo 3 días de trabajo efectivo. A pesar de estos inconvenientes, se ha podido realizar una campaña de trabajo normal en los emplazamientos de isla Decepción y de península Hurd en isla Livingston, con el fin de cubrir los objetivos planteados.

De esta forma, la campaña se desarrolló entre los días 19 de diciembre de 2021 y 20 de febrero de 2022, con los siguientes hitos:

- 19 de diciembre: Salida de España

- 20 de enero: Llegada a Ushuaia (Argentina) e inicio de la cuarentena
- 31 de diciembre: Fin de la cuarentena y embarque en el B/O Sarmiento de Gamboa rumbo a la Antártida
- 4 de enero: Llegada a Isla Decepción e inicio de tareas
- 21 de enero: Embarque en el BIO Hespérides
- 23 de enero: Llegada a península Byers, isla Livingston, e inicio de tareas.
- 28 de enero: Embarque en el B/O Sarmiento de Gamboa y traslado a península Hurd, isla Livingston e inicio de tareas.
- 13 de febrero: Embarque en el BIO Hespérides e inicio de tránsito hacia Punta Arenas (Chile)
- 17 de febrero: Llegada a Punta Arenas (Chile) y alojamiento en Hotel a la espera de iniciar viaje de regreso
- 19 de febrero: Salida en avión de Punta Arenas (Chile)
- 20 de febrero: Llegada a España

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. 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.

Personal investigador

El personal investigador desplazado a la zona de estudio se redujo a una persona con la experiencia antártica (13 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 2021-22. 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.

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, aunque, en el emplazamiento de península Byers, con menos tiempo del requerido para hacer otras tareas secundarias igualmente importantes. En todo caso, siempre se contó con el apoyo de personal técnico de las bases antárticas para poder realizar los trabajos, recibiendo el apoyo necesario para llevar a cabo algunas de las tareas necesarias.

Durante la estancia en la isla Decepción se realizó el mantenimiento de todas las estaciones situadas en la misma, incluyendo algunas estaciones PT y CALM 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 de 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.

Debido a las fechas en las que se estuvo trabajando en la isla Decepción, no se tomaron los datos *in situ* del espesor de la capa activa en el CALM de Crater Lake, ya que las medidas no serían comparativas con las tomadas en años anteriores. Para la toma de estos datos se contó con la colaboración de investigadores del proyecto de Series Temporales GEO2-OCEAN, de la Universidad de Cádiz, y de la red de monitorización Sísmica del IGN en isla Decepción, quienes hicieron la toma de datos a principios de marzo.

En la fase de trabajo en península Byers de la isla Livingston, debido a lo corto del periodo de trabajo y las condiciones meteorológicas adversas, se realizó el mantenimiento de las estaciones, pero no se procedió a la desmantelación de la cámara fotográfica automática más antigua, tarea que queda pendiente para siguientes campañas. Por otro lado, y aunque la fecha tampoco era la más adecuada, se procedió a la toma de datos de espesor de la capa activa, con la colaboración de los investigadores portugueses de la PERMANTAR.

También en península Byers estaba prevista la instalación de sensores de temperatura en la estación abandonada de lago Domo, que había sido establecida de forma temporal por el investigador Dr. Marc Oliva, de la Universidad de Barcelona, y que había sido cedida para ser incorporada a la red PERMATHERMAL. Por las mismas razones anteriormente mencionadas, estas tareas de instrumentalización de esta estación fueron llevadas a cabo por el investigador del CIEMAT Thomas Schmid, quien se encargó de la instalación de los sensores y la toma de datos gráficos de dicha estación.

Finalmente, en la fase de trabajo en península Hurd de la isla Livingston, se tuvieron 15 días de trabajo para la realización de todo el mantenimiento de las estaciones, así como para la instalación de los nuevos dispositivos en las estaciones repartidas por todo el entorno de la BAE JCI.

Previamente a la llegada a la zona de contó con la colaboración del Investigador Dr. Gonçalo Vieira y su equipo de la red PERMANTAR (y otros proyectos del programa polar portugués) que revisaron el estado de una de las estaciones, la más importante de la red y cuyo estado era crítico para poder organizar de forma adecuada las actividades a realizar durante esta fase.

La falta de financiación de los últimos años se ha podido solventar y con ello realizar durante esta campaña la renovación de una gran parte de los instrumentos, alcanzando para los fundamentales de las estaciones PT y algunos de las estaciones CALM. Queda pendiente la renovación de otros instrumentos, si bien, debido al número, son muy costosos, y llevarán algunos años realizar su renovación. En todo caso, de esta forma parece asegurada la continuidad de la serie temporal y la mejora de la calidad de sus datos.

Consecución de objetivos

Con todas las actividades realizadas, se ha conseguido alcanzar el 95% de los objetivos marcados para la campaña 2021-22, 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 TP; la recuperación de imágenes de las cámaras fenomenológicas instaladas, y de la estación nivométrica de la red. Quedó pendiente la retirada de otros instrumentos obsoletos y completar la renovación de instrumentos secundarios para las siguientes campañas.

El estado de las estaciones

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 bueno.

En isla Decepción, solo cabe destacar la existencia de problemas en tres instrumentos. Por un lado, en la estación nivométrica situada en la zona de Crater Lake que, aunque permanecía en pie, tenía algunos sensores rotos o flojos y no había registrado datos de forma continuada, posiblemente al agotamiento de la batería tras el problema de descarga completa del año previo cuando la estación se volcó. Por otro lado, un fallo importante en la cámara fenomenológica 2 situada en la colada de lava próxima a la zona CALM de Crater Lake. Se encontró la cámara con los tapones de conexiones abiertos, posiblemente debido a la vibración continuada por la presencia del reflector radar adjunto al mástil, que debió hacer efecto vela causando fuertes movimientos durante todo el invierno. Esto hizo que entrara humedad en el interior de la cámara, que mostró fallos múltiples haciendo imposible su reparación, si bien se comprobó que sólo había trabajado durante algunas semanas a lo largo del invierno. Finalmente, la estación DECBOR3 asociada a nuestro sitio DEC-CL-3 tampoco había registrado datos de temperatura del suelo en la sonda termométrica, y la radio estaba inoperativa.

En isla Livingston, en la península Byers no se observaron problemas, a pesar de haber estado dos años sin mantenimiento debido a la imposibilidad de visitar el emplazamiento en la campaña 2020-21. Por otro lado, en península Hurd, tampoco se encontraron problemas especiales, salvo la rotura de un protector de radiación en la estación de Nuevo Incinerador, y que el registrador de datos CR1000 asociado al sondeo de 25 metros en la cumbre del Monte Reina Sofía, había perdido la totalidad de los datos por un fallo electrónico sin determinar. En la estación de Nuevo Incinerador también se encontró el sondeo con gran cantidad de agua, posiblemente debido a la descongelación del hielo acumulado en varias campañas anteriores por condensación. Sorprendentemente, en la estación del Glaciar, próxima a la cima del citado monte, no se han registrado problemas, más allá de vientos poco tensos.

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

Mantenimientos realizados

Las tareas de mantenimiento más comunes fueron el tensado de vientos y el afianzamiento de los mástiles de las estaciones PT.

En el caso de la estación nivométrica de Crater Lake, se procedió a reparar los vientos rotos y a tensar los demás, así como el recalibrado de los instrumentos de la balanza de nieve y de espesor de nieve. Se realizó también el cambio de posición de los vientos de la estación nivométrica, con el fin de evitar su interferencia con el sensor de espesor de nieve.

En la cámara fenomenológica 2 de Crater Lake, se procedió a desmantelar el reflector radar, y a subir el panel solar en el mástil, para asegurar una mayor iluminación de este, evitando la cobertura de nieve en el invierno. Finalmente, se retiró la cámara, que será evaluada y, en su caso, reparada, en territorio nacional. De esa forma, se quedó el mástil y la electrónica conectada, pero sin cámara.

En cuanto a la estación DEC-S3, se retiró la radio y los sensores de temperatura del terreno, temperatura superficial y humedad del terreno, dejando únicamente el sensor de temperatura y humedad como comparativa para el sensor de nueva instalación.

En península Byers se procedió al cambio del mástil de temperatura del aire, que llevaba unos años completamente oxidado y se deshacía al menor contacto, tras 14 años operativo. El resto de los instrumentos no requirió mantenimientos adicionales.

En península Hurd, se realizó la extracción y completa desmantelación de la electrónica correspondiente a la estación del Sofia, ya que los fallos en la electrónica y la sonda en los últimos años ha llevado a una muy mala serie temporal. Por otro lado, como se detallará más adelante, se procedió a la recuperación del sondeo de 80 cm del Monte Reina Sofía, que había sido semiabandonado en el año 2017 cuando una rotura en el tubo de la perforación hizo que se llenara de hielo, quedando inoperativo. Los años siguiente fue imposible realizar su recuperación por falta de tiempo en la campaña o por exceso de nieve. En la estación Morrena se procedió al cambio del mástil del termonivómetro, que, tras 10 años operativo, estaba fuertemente deteriorado.

En la estación Incinerador se procedió a la reubicación de los sensores de temperatura del termonivómetro, ya que al verse levantado el mástil por los

ciclos de hielo-deshielo, las alturas de sus posiciones no se correspondían con las teóricas.

En la estación Nuevo Incinerador se procedió a reparar el protector de radiación para que quedara de nuevo operativo.

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, si bien uno se ha retirado de forma temporal hasta la reparación del instrumento.

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. La cámara fenomenológica 2, se ha retirado temporalmente hasta su reparación.

El experimento de temperatura superficial distribuida en la malla CALM de Crater Lake, no pudo ser instalado 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 había sido retirados en la campaña anterior. 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 parte de los sensores, si bien siguen en su lugar la caja de electrónica, panel solar, batería y un sensor de temperatura del aire. Se plantea desmantelar completamente esta estación en futuras campañas.

En península Byers, aunque estaba planificado, no fue posible desmantelar la cámara fenomenológica 1A debido a la falta de tiempo por ser una campaña excesivamente corta en dicho emplazamiento.

Como se ha comentado, en península Hurd se ha retirado la sonda y la electrónica asociada a la estación de Sofía, pues la nueva instrumentación no lo requiere, liberando así el terreno de elementos antrópicos.

Instalación de nuevos instrumentos

Durante la campaña 2021-22 se ha realizado la instalación de algunos elementos, con el fin de complementar la instrumentación existente. Así, se instaló un termónivómetro en el sondeo 4 de Crater Lake, que carecía de él, y un dispositivo de temperatura del aire, tanto en la estación Glaciar en península Hurd, como en el sondeo 1 de Crater Lake en isla Decepción. En el primer caso, con la ubicación de un nuevo mástil en el terreno, y en el segundo, únicamente con un protector de radiación en los mástiles ya existentes.

En todas las demás estaciones, no se realizó una nueva instalación en sentido estricto, pero sí que se llevó a cabo la renovación de los instrumentos, eliminando los sensores de tipo *Tinytag* e *iButton* utilizados para las medidas de la temperatura del aire, de la superficie del suelo y del terreno en profundidad, para ser sustituidos por otros dispositivos *Geoprecision*. Esta sustitución ha supuesto el hito más importante de la campaña y la entrada de la red PERMATHERMAL en otra nueva época en la que el mantenimiento de los sensores será más sencilla y rápida, y se ganará en resolución y continuidad de los datos. De hecho, esta actualización ha consumido el presupuesto de tres campañas.

En la estación de Sofía, al recuperarse el sondeo de 80 cm que se había semiabandonado en el año 2017, se han vuelto a instrumentalizar con dispositivos *iButton* a la espera del año próximo poder instalar los nuevos dispositivos *Geoprecision*.

Por otro lado, dado que se ha procedido a incorporar la estación Domo a la red PERMATHERMAL, se han instalado sensores de temperatura del aire y del suelo de tipo *Geoprecision*, y se espera poder instalar los de temperatura del terreno, también con este tipo de dispositivos, en la siguiente campaña.

Incidencias

Sin incidencias que destacar en la realización de la campaña Antártica 2021-22 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 2021-22 se han recuperado un total de 10,74 Gb de datos, en 10.832 archivos de un total de 57 experimentos con unos 441 sensores instalados en la zona antártica, incluyendo las fotografías de las cámaras fenomenológicas y la estación nivométrica.

En general, a pesar de la antigüedad de los sensores empleados, que no habían sido renovados por completo en la última campaña, la cantidad de fallos en los mismo y la pérdida de datos no ha sido tan elevada como se esperaba. A pesar de ello, las duras condiciones meteorológicas del invierno de 2021 han producido daños y pérdidas de datos en algunos otros sensores e instrumentos. Estos fallos y pérdidas de datos afectan a la calidad y continuidad de la serie temporal generando lagunas en algunas de las experiencias, aunque la continuidad del estudio del régimen térmico del permafrost y la capa activa no peligran. La renovación de la instrumentación llevada a cabo pretende terminar con estos problemas a partir de esta campaña.

Disponibilidad de datos

La disponibilidad de datos es muy distinta en función de los instrumentos y su emplazamiento (Tabla 5) 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 5). Así, los sensores utilizados para la medida de la temperatura del aire (AT) son tipo *Tinytag*, con sonda externa y batería reemplazable, mientras que los sensores utilizados para la medida de la temperatura de la nieve (ST), de la superficie (GST) o del terreno (GT) son, de forma general, sensores tipo *iButton*, con batería interna no reemplazable y memoria más limitada. En todo caso, tanto en los termonivómetros (ST) como en los sondeos (GT) hay varios sensores, por lo que el fallo de uno de ellos es suficiente para ser categorizado como “pérdida parcial de datos”, a pesar de que los demás datos estén disponibles.

Campaña Antártica 2021-22

Tabla 5: 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.

| 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 | 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 | PT | ● | ● | ● | ○ | | | |

En el caso particular de los sensores de temperatura instalados en península Byers, al no haberse podido realizar el mantenimiento durante la campaña 2020-21, los sensores de tipo *iButton*, los que no resultaron dañados o su batería agotada, vieron su memoria llena en junio del 2021. Resultando, por tanto, en la pérdida de seis meses de datos de dicho año 2021.

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

Temperatura del aire (AT): Todos los sensores han funcionado de forma correcta, si bien se ha detectado un comportamiento térmico levemente distinto en el sensor de la estación CALM de Cráter Lake, continuando con lo observado el año anterior. Esta deriva, que anteriormente no parecía a priori un fallo del instrumento, se ha confirmado que si lo es. Todos los demás instrumentos han funcionado de forma correcta, incluido el de la estación de la península Byers, a pesar de que la pasada campaña no pudo realizarse su mantenimiento.

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, 4 con 6 de 7 sensores operativos, 2 con 5 sensores, y 3 con 4 de 7. Esto, en general, permitirá obtener aproximaciones relativamente buenas del espesor de nieve en cada emplazamiento.

Temperatura de la superficie (GST): Debido a las duras condiciones ambientales y la antigüedad de los sensores utilizados, se han perdido algunos datos de los experimentos de temperatura superficial de experimentos secundarios (2 de 8), pero los sensores de las estaciones principales de la red PERMATHERMAL, se han recuperado en buenas condiciones y se han podido rescatar datos de los 7 instalados.

Temperatura del terreno (GT): En general se ha podido recuperar datos de la mayor parte de los sensores instalados en el interior de los sondeos que permiten caracterizar térmicamente el comportamiento de los suelos (permafrost y capa activa) en las estaciones de las islas Livingston y Decepción. Aunque hay pérdida de datos en algunos sensores, es posible utilizar los datos disponibles para el estudio térmico de los suelos. Sólo en el sondeo de la estación Sofía en península Hurd, se ha producido la total pérdida de datos debido a un fallo en la electrónica.

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 Limopolar Lake (A25), situada en península Byers de la isla Livingston. Destacar que la fecha de la medición de la primera es muy posterior a la usual, y en el caso de la segunda, ligeramente anterior.

Temperatura del techo del permafrost (TTOP): Se han podido recuperar los datos de 11 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. La pérdida de datos, en este caso es únicamente debida a la antigüedad de los dispositivos, no renovados en la campaña anterior.

Temperatura superficial distribuida (GT): Se han podido recuperar los 36 sensores instalados en el CALM de Limnopol Lake, que no fueron recuperados en la pasada campaña, de los que 8 estaban dañados y se han perdido sus datos, y de los 28 restantes, sólo 3 han podido registrar datos durante los años 2020 y

2021. El resto únicamente del año 2020, al llenarse su memoria y no haber sido reemplazados en la campaña previa al no visitarse la zona.

Espesor de nieve distribuida (ST): Los 3 termónivómetros situados en el CALM del Cráter Lake no tenían sensores instalados, pues en la campaña anterior, debido a la falta de sensores, los disponibles para este experimento fueron utilizados en el mantenimiento de las estaciones en 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, 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, más allá de algunos vientos sueltos, y se han podido recuperar datos registrados a lo largo del año 2021. Sin embargo, se han observado numerosos cortes en la secuencia de datos, presumiblemente por problemas de alimentación, afectando a todos los datos de la estación.

Fotografías fenomenológicas (TLC): de las 6 cámaras instaladas en la red PERMATHERMAL (4 modernas, modelo C5MPX, y 2 antiguas, modelo CC640), se han recuperado datos de todas ellas, si bien con algunos problemas detectados. En el caso de la cámara antigua de Cráter Lake (CAM1A), aunque se han recuperado 866 fotografías, ésta perdió la fecha y algunas de las fotos corresponden a periodos de noche. Además, se observa que se produjo un movimiento del soporte de la cámara, perdiendo el encuadre original. Esta cámara ha quedado desmantelada. Por otra parte, la cámara 2 de reciente instalación tiene una pérdida parcial de datos, mostrándose interrupciones a lo largo de todo el año. Se han recuperado solo 122 fotografías, y la cámara se encuentra inoperativa a la espera de su reparación. La otra cámara de este lugar funcionó con normalidad recuperándose 1133 fotografías del año 2021. En el caso de las cámaras del CALM de Limnopolar Lake, de la antigua pudieron recuperarse 867 fotografías correspondientes a los años 2020 y 2021, mientras que de las dos modernas se recuperaron 2.220 correspondientes a esos mismos años, sin detectarse cambios en el encuadre ni daños en la electrónica. La cámara antigua, aunque quedó instalada, pero sin tarjeta de memoria, a la espera de su desmantelación.

Temperatura del Aire

Las temperaturas del aire registradas durante el año 2021 (Fig. 2) se mantienen entre los -21°C de mínima, alcanzados a mediados del mes de agosto, y los 10°C alcanzados a principios de enero de 2022. A diferencia del año 2020, 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 -10°C y -20°C .

Entre las estaciones, cabe destacar una gran similitud de la evolución térmica, especialmente hasta finales de agosto, momento desde el que las diferencias entre los datos registrados por las distintas estaciones de medida (septiembre 2021 – enero 2022) son más evidentes que los registrados en el verano antártico anterior (febrero-marzo 2021). Es precisamente durante las épocas estivales donde las variabilidades térmicas son más reducidas entre las estaciones, de unos 3°C , que las que se dan en el invierno, alcanzándose variaciones de hasta 16°C , con días donde se alcanzan los 0°C e inmediatamente después las mínimas temperaturas registradas. En verano las temperaturas medias rondan los 3°C - 4°C , mientras que durante la primavera las temperaturas medias y se posicionan en rangos positivos de entre 1°C - 2°C . Este año el final del verano podría establecerse térmicamente a finales de abril, un mes y medio más tarde que el año 2020, donde las temperaturas, comienzan a tener una mayor variabilidad y las medias comienzan a descender.



Figura 2: Temperaturas del aire (en $^{\circ}\text{C}$) registradas en las distintas estaciones de la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción, Antártida, entre febrero de 2021 y enero 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. 3) tienen un comportamiento similar, como cabe esperar, a los datos de temperatura del aire (Fig. 2).

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 esta cubierta nival empieza a alcanzar un cierto espesor en torno a finales de mayo, 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 en algunas estaciones, con más de 80 cm de espesor. La completa desaparición de la cubierta de nieve se produce en torno a finales de diciembre en las estaciones donde se alcanzó el mayor espesor (Fig. 3), 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.

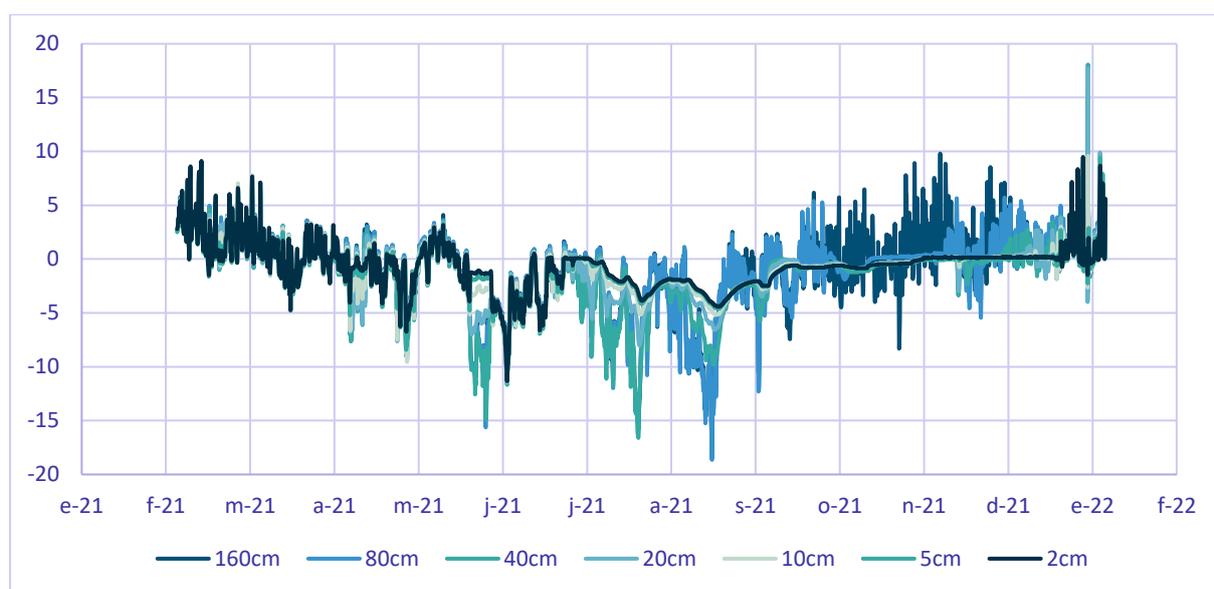


Figura 3: Temperatura de la nieve (en °C) en una de las estaciones de la isla Decepción, mostrando el distinto comportamiento de la temperatura del aire a distintas alturas sobre el suelo cuando existe una cubierta de nieve.

Temperatura de la superficie

La temperatura de la superficie del suelo registrada en las estaciones de monitorización donde se han podido recuperar datos (Fig. 4) 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 no son tan importantes (Fig. 2), en la temperatura de la superficie del suelo se ve una clara variación del comportamiento de unas a otras. Es en la estación situada en la cima 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, no habiéndose alcanzado el final del periodo de congelación aún en enero de 2022, mientras que en el resto de las estaciones se produce entre noviembre y diciembre de 2021. El inicio del periodo de congelación es también más temprano y brusco en esta estación situada a más altitud, que, en el resto de las estaciones, a mediados de marzo de 2021, como en años anteriores.

Las temperaturas máximas del suelo son menores que en el año 2021 (cuando se alcanzaron más de 23°C), llegando a menos de 16°C en enero de 2022, en las estaciones situadas a menor cota. Las temperaturas más frías se alcanzaron en la estación de Sofía en mayo de 2021 con temperaturas de -11°C.

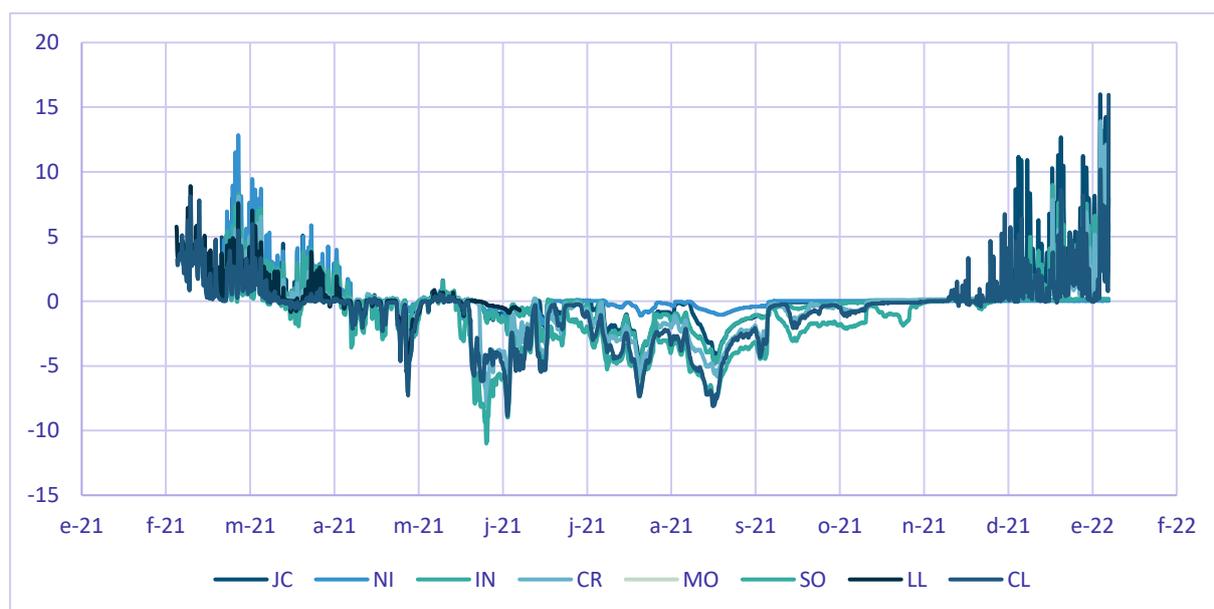


Figura 4: Temperaturas de la superficie del suelo (en °C) registradas en 6 de las 7 estaciones de monitorización de la red PERMATHERMAL en las Livingston y Decepción de la Antártida, entre febrero de 2021 y enero de 2022.

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. 5) más cerca de la superficie tienen un comportamiento similar a los de la temperatura de la superficie (Fig. 4), registrándose temperaturas de hasta 20°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 -8°C, más altas que las del año 2020. Estas oscilaciones térmicas del invierno no afectan a profundidades mayores de 50 cm en invierno.

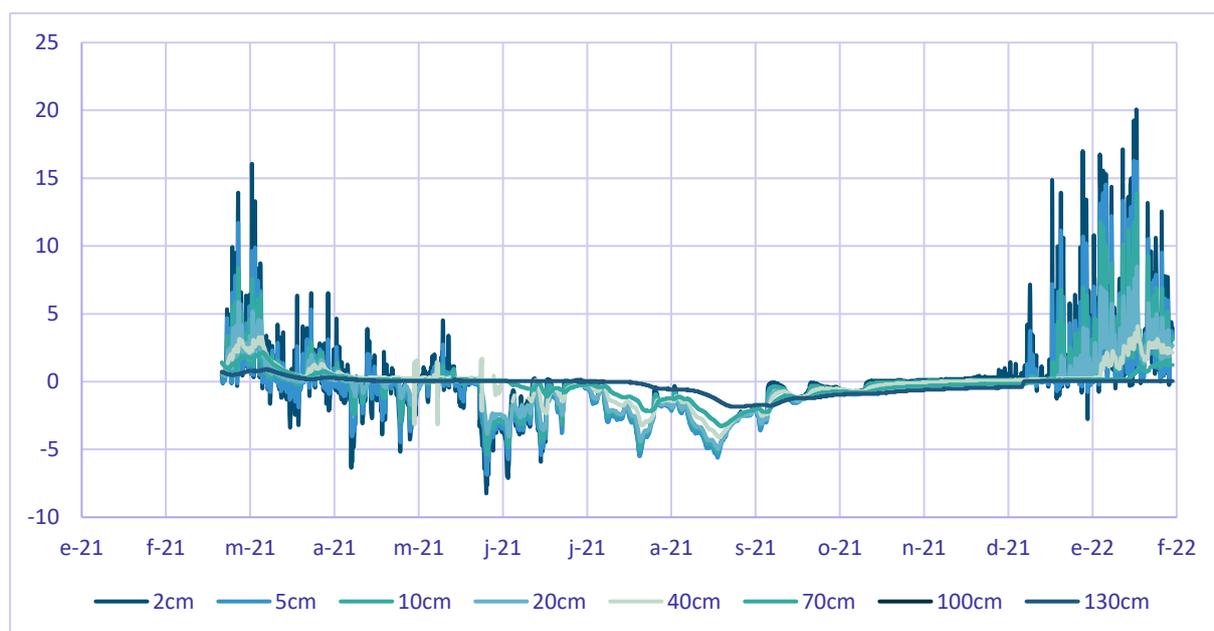


Figura 5: Datos de temperatura del terreno (en °C) registrados en el sondeo CL_BOR_S1 en isla Decepción, entre febrero de 2021 y enero de 2022.

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 el CALM de Crater Lake, en isla Decepción, a principios de marzo de 2022 (Fig. 6), continuando así la toma de datos de este parámetro de forma ininterrumpida desde 2006, cuando se instaló la malla de control en este lugar.

Los datos muestran una cierta homogeneidad en toda la malla, con espesores de entre 30 y 40 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.

Estos valores son muy similares a los medidos el año anterior pero quince días antes, y equiparables a los de años previos, si bien estos se midieron en fechas bastante anteriores (finales de enero y principios de febrero). Además de valores similares, en los datos de este año 2022 se registra un patrón de distribución espacial muy similar a la de años anteriores, con valores más bajos en la parte central del CALM a lo largo del eje Y, lo que confirma la no aleatoriedad de los valores o la existencia de artefactos en los datos o errores sistemáticos en la toma de medida, que además se toman a lo largo del eje X.

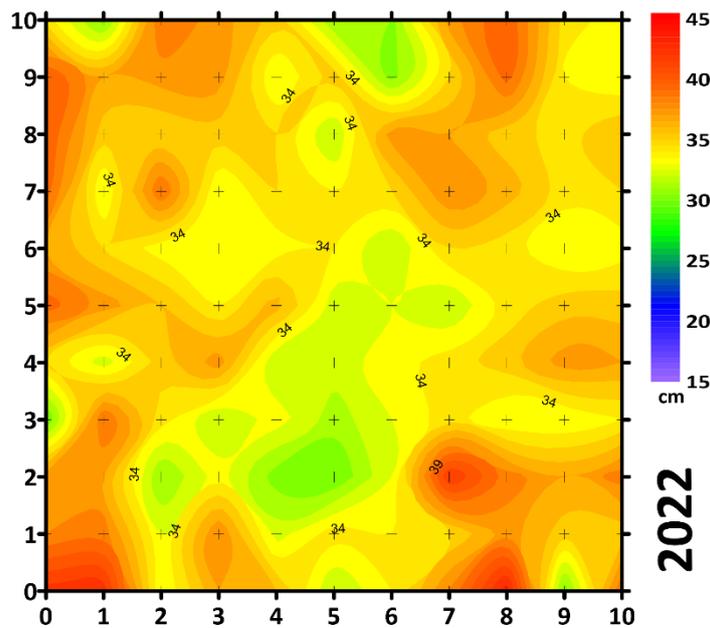


Figura 6: Mapa de espesor de la capa activa medido en el CALM de Cráter Lake, en isla Decepción, el 15 de febrero de 2021.

Temperatura del techo del permafrost

La Temperatura del Techo del Permafrost (TTOP) se mide de forma continuada en 16 nodos de la malla CALM de Crater Lake en isla Decepción, si bien este año, solo se han obtenido datos de 11 de ellos. En esos datos se puede observar temperaturas próximas a los 0°C durante 6 meses al año (Fig. 7), excepto en los meses de invierno, entre junio y octubre. En este periodo la temperatura del techo del permafrost desciende hasta alcanzar mínimas de hasta -5°C, menos frías que el año 2020 que se alcanzaron los -8°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, como es el caso del nodo (6,8), o donde las temperaturas del invierno son mucho menos frías (casi 3°C 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 principios de septiembre en algunos nodos, y a principios de octubre en otros, cuando las 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.

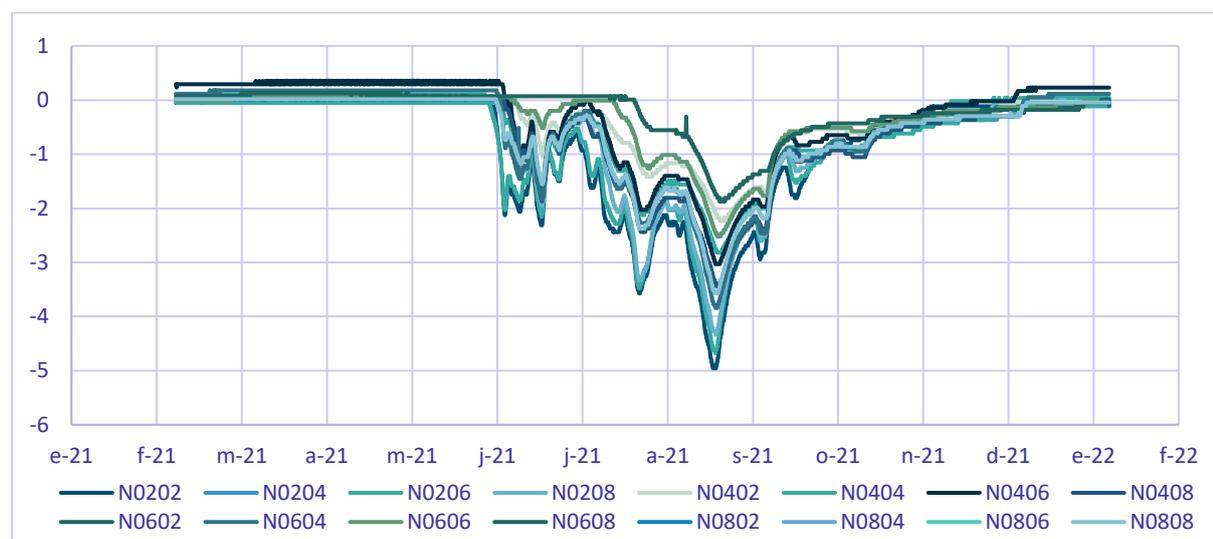


Figura 7: Evolución temporal de las temperaturas del techo del permafrost en los nodos de la malla CALM de Cráter Lake en isla Decepción, Antártida, entre diciembre de 2019 y enero de 2021.

Temperatura superficial distribuida

En el CALM de 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 21, y no pudieron ser recogidos los de la malla CALM Limnopolar Lake en isla Livingston, hasta enero de este año. El resultado es que solo 3 de los 36 sensores instalados en esta última malla CALM han recogido datos del año 2021 (Fig. 8). En todo caso, los escasos datos disponibles muestran un comportamiento similar a los de la temperatura superficial correspondiente a este emplazamiento (Fig. 4).

Cabe destacar la clara determinación del inicio y fin del periodo de congelación entre finales de marzo y principios de diciembre de 2021, con diferencias de unos pocos días 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 3 nodos de los que hay datos, a principios de septiembre, tal y como se 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 2021 como en 2022, presentan una gran variabilidad, mayor que la del mismo periodo en 2020, con picos de hasta 18°C, mientras que las mínimas del invierno no bajan de los -6,5°C a finales de abril de 2021.

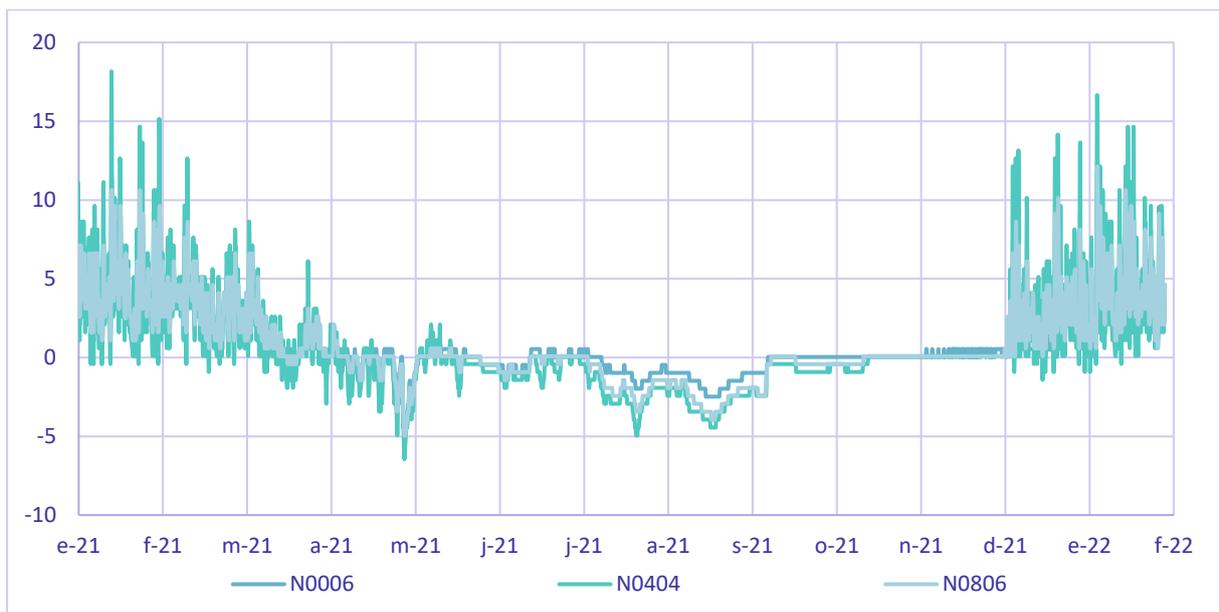


Figura 8: Temperatura superficial (en °C) distribuida por los nodos pares de la malla CALM Limnopolar Lake de la isla Livingston, medida entre enero de 2021 y enero de 2022.

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. 6) o de temperatura superficial (Fig. 8) o TTOP (Fig. 7) en la malla. En enero de 2021 no se instalaron sensores en estos instrumentos en el CALM de Crater Lake, y los del CALM de Limnopolar Lake no pudieron ser mantenidos, por lo que no se dispone de datos de la totalidad del año 2021 en dicha malla.

Los datos disponibles (Fig. 9) muestran un comportamiento muy similar a los de los termonivómetros de las estaciones PT (Fig. 3), 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. Los datos disponibles solo permiten deducir el comienzo de la acumulación de nieve en el otoño, alcanzándose los 20 cm de espesor a mediados de mayo y hasta que se cortó la serie de datos a principio de junio de 2021.

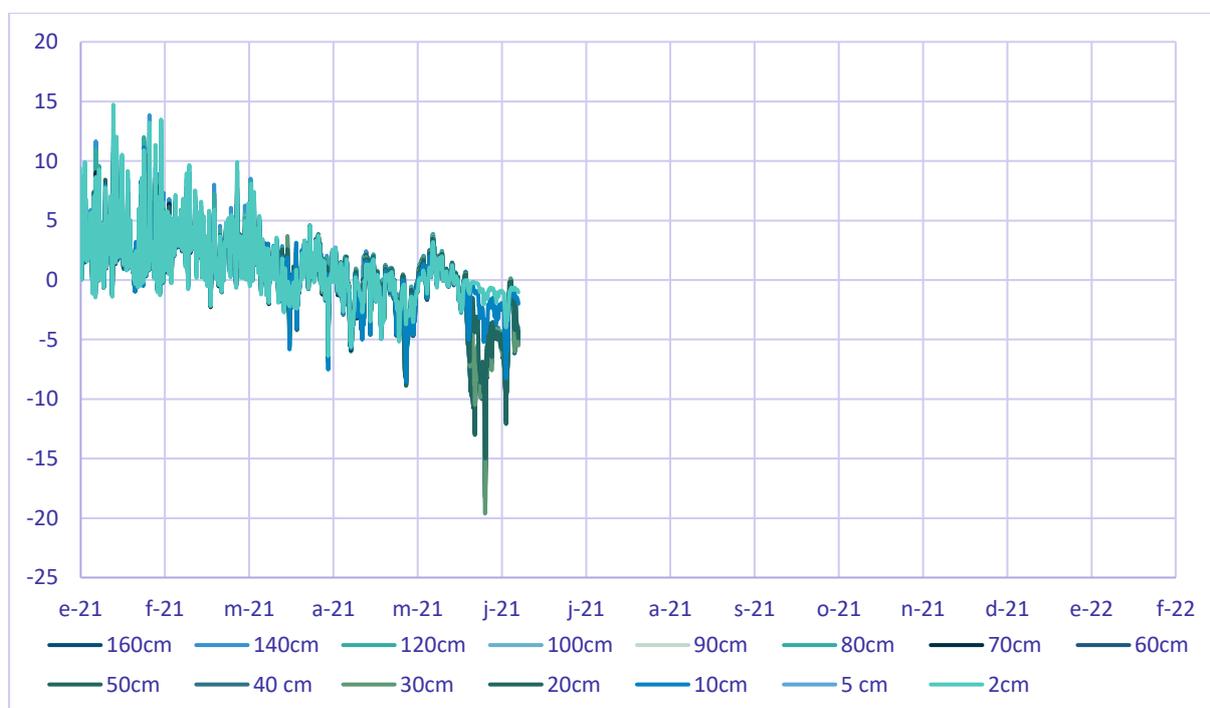


Figura 9: Ejemplo de temperaturas del aire a distintas alturas (en °C) registradas por los sensores de un termonivómetro de alta resolución de entre los situados en la malla CALM Limnopolar Lake en isla Livingston, utilizados para el estudio del espesor de nieve distribuida por dicha malla.

Parámetros nivométricos

Reinstalada la estación a principios de febrero de 2021 tras haber sido volcada por el aire, la estación nivométrica ha registrado datos en todos sus instrumentos, si bien cabe destacar distintos cortes a lo largo del invierno, posiblemente debido a problemas de la batería. Esto ha afectado de forma más importante al sensor de espesor de nieve, que, aunque ha registrado datos en los demás periodos, muchas veces no eran válidos.

Los datos de temperatura del aire (Fig. 10) son similares a los medidos en la zona de Crater Lake por los sensores de las estaciones PT (Fig. 2), y la humedad del aire se mantuvo entre valores del 60 y el 100%, bajando solo puntualmente a valores de hasta el 51%.

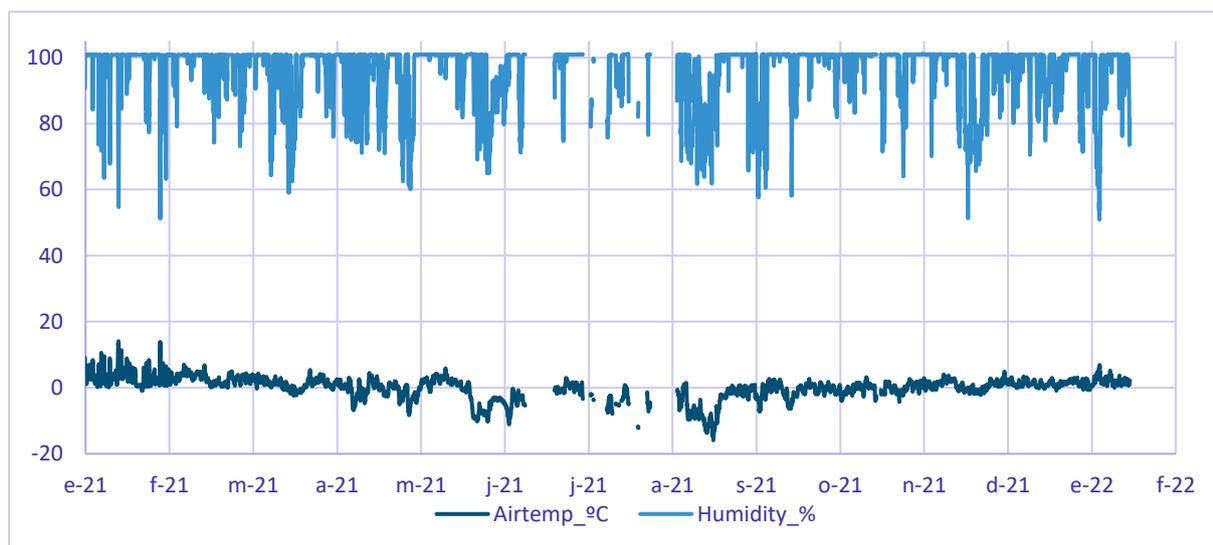


Figura 10: Datos de temperatura (en °C) y humedad relativa del aire (en %) registrados en la estación nivométrica a lo largo del año 2021 en isla Decepción.

Por otro lado, los datos de radiación total e infrarroja, tanto incidente como reflejada (Fig. 11), muestra el comportamiento típico a lo largo del año relacionado con más horas de luz en el verano austral, y con una mayor reflectividad en el invierno debido a la presencia de la cubierta nival, cuya desaparición se observa claramente en los datos del piranómetro a principios de diciembre. En este mismo sensor se puede observar la llegada de las nieves a mediados de marzo y antes, en febrero, algunas nevadas del verano. 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.

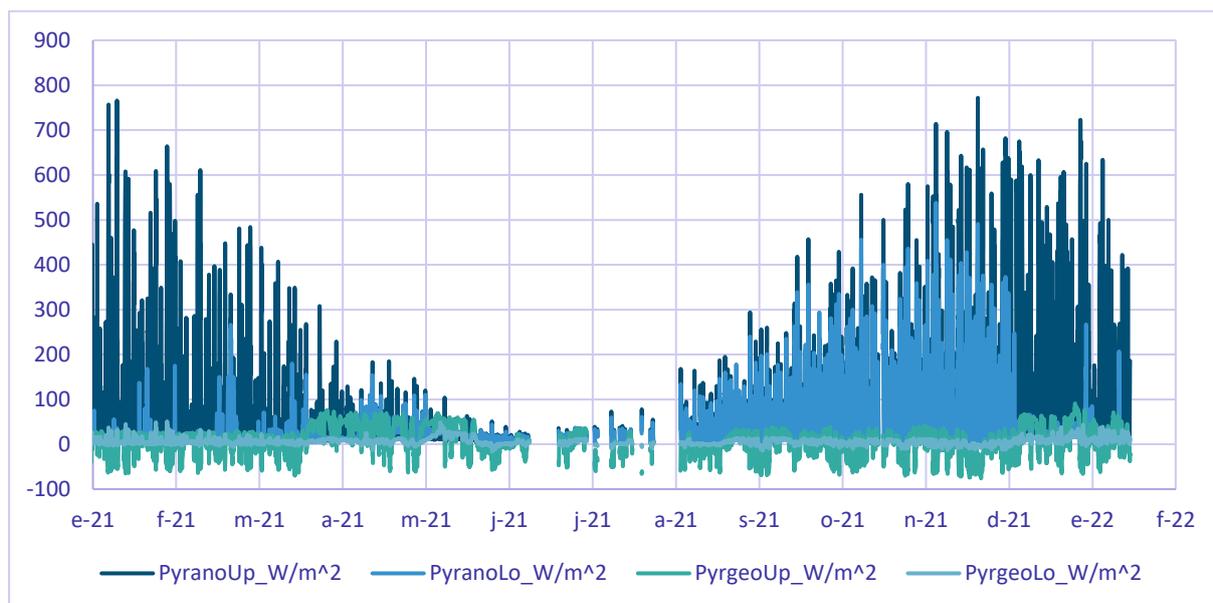


Figura 11: Datos de radiación solar incidente y reflejada medidos por los sensores piranómetro y pirgeómetro instalados en la estación nivométrica.

Los datos de temperatura de la nieve (Fig. 12) muestran un comportamiento similar al registrado en los sensores de los termonivómetros (Figs. 3 y 9). La variabilidad térmica de cada sensor, y la diferencia de variabilidad entre sensores a alturas contiguas sobre el terreno permite deducir espesores similares a los medidos en los termonivómetros, de unos 70 cm. Al igual que en los termonivómetros, se puede observar la llegada del manto permanente de nieve se produce a principios de marzo y su completa desaparición ocurre a principios de diciembre, tal y como se observar al finalizar la fase isoterma.

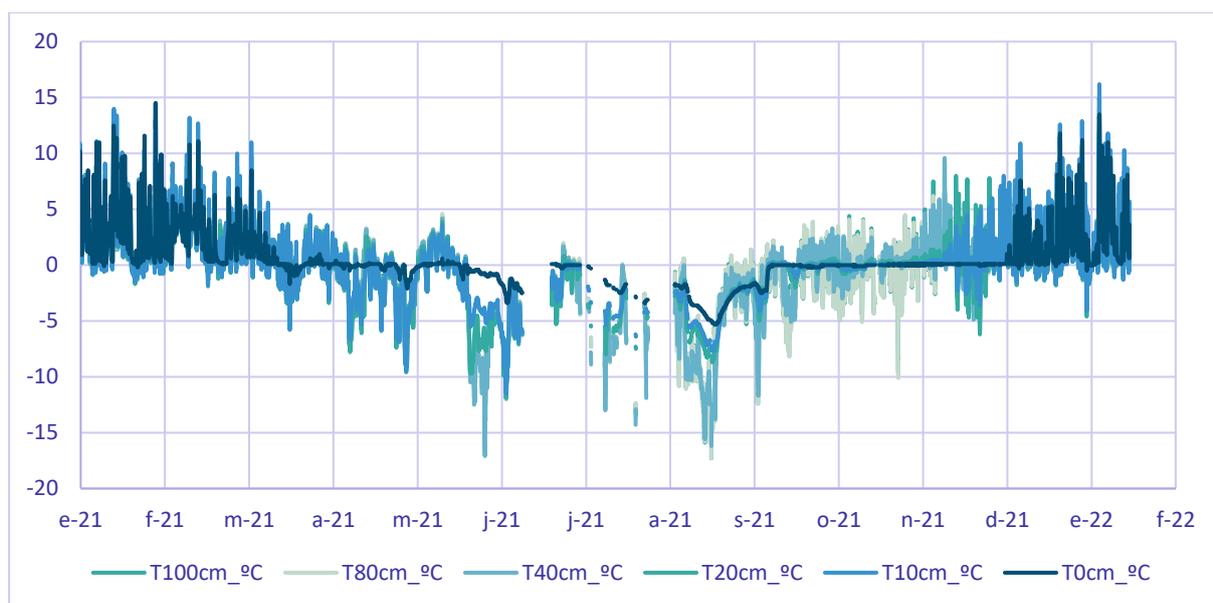


Figura 12: Temperatura del suelo y temperatura de la nieve en los sensores instalados en la estación nivométrica en el CALM de Crater Lake, isla Decepción.

Los sensores para la obtención de parámetros de la nieve funcionaron perfectamente, aunque con las mencionadas interrupciones. Los datos de equivalencia en agua del paquete de nieve (Fig. 13) muestran las variaciones a lo largo del año a medida que se va acumulando y desapareciendo la nieve, alcanzándose más de 3000 mm durante el invierno (noviembre de 2021).

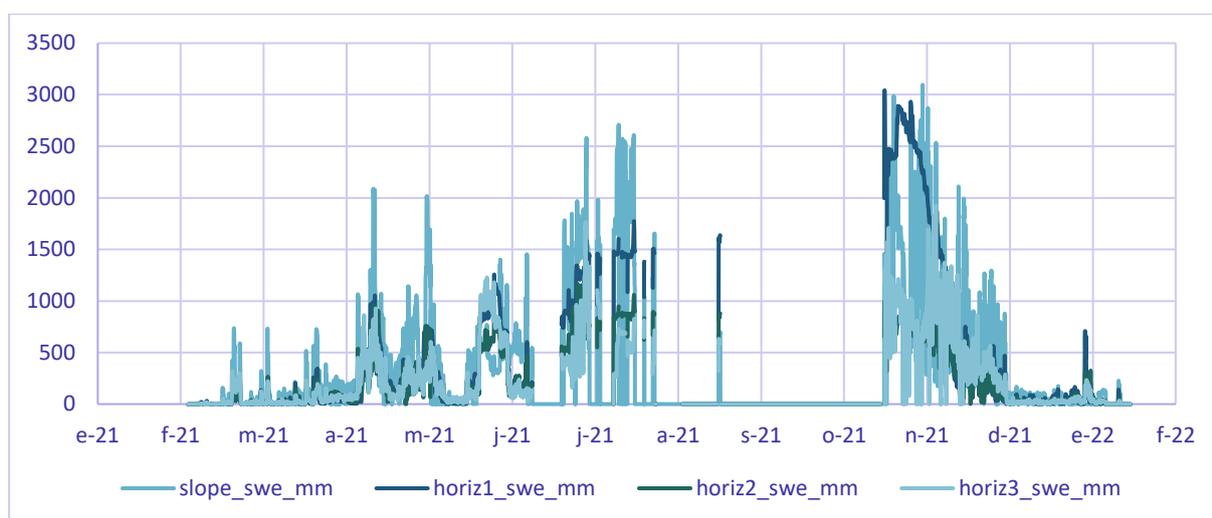


Figura 13: Medidas de equivalente en agua (SWE, en mm) de la nieve medidos en 2021 a distintas alturas sobre el terreno.

Los datos de densidad de la nieve medidos por la estación nivométrica, aunque con mucho más ruido que requiere su tratamiento previo al análisis definitivo, muestran cómo, de forma general, el mayor espesor se alcanza en las zonas profundas del manto de nieve, alcanzándose valores en torno a los 500 kg/m³, siendo el valor medio de todo el paquete en torno a los 350 kg/m³ (Fig. 14).

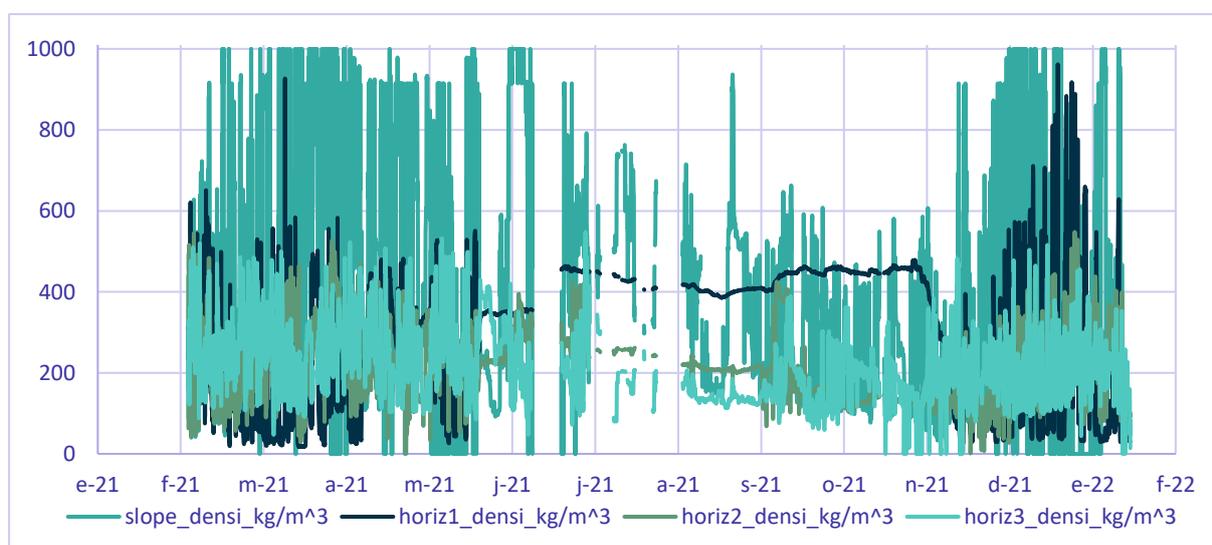


Figura 14: Densidad del manto de nieve (en kg/m³) medido a distintas alturas en isla Decepción durante el año 2021.

Los datos de contenido en hielo (Fig. 15) y en agua (Fig. 16) del paquete de nieve (que igualmente requieren un tratamiento para eliminar el ruido) también muestran las variaciones en las condiciones de dicho manto de nieve, con la aparición de capas de hielo en momento de helada (Fig. 15), o aumentando el contenido en agua en los periodos de descongelación (Fig. 16). Cabe destacar cómo el inicio de la descongelación (pérdida de hielo y aumento del contenido en agua) del paquete de nieve comienza a finales de octubre.

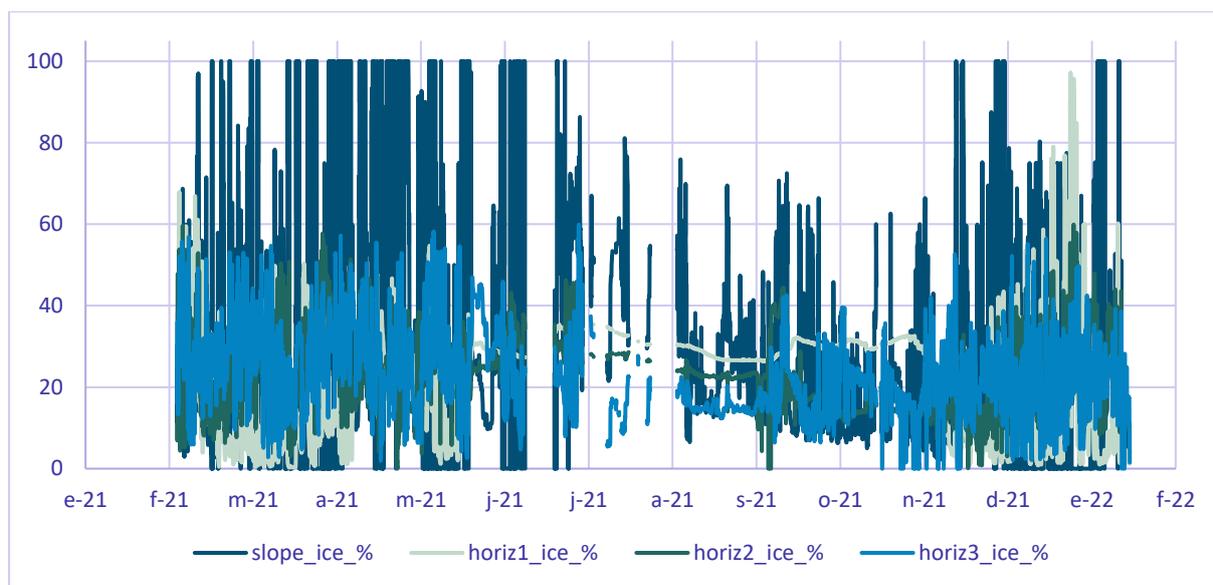


Figura 15: Contenido en hielo del manto de nieve (en %) registrado a distintas alturas por la estación nivométrica en isla Decepción en el año 2021.

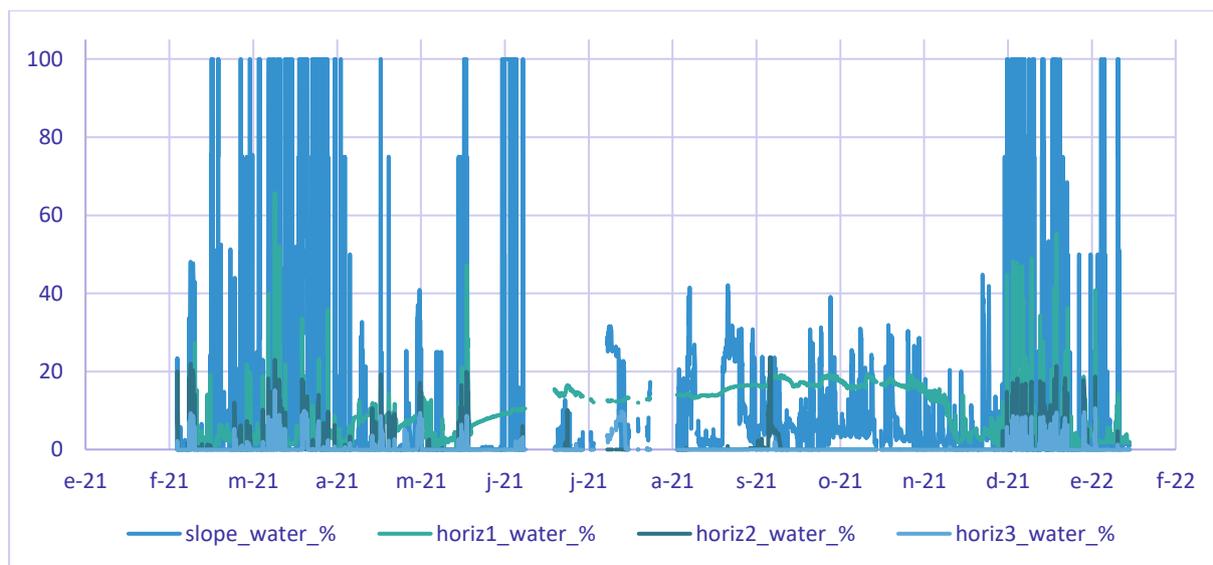


Figura 16: Contenido en agua (en %) del manto de nieve a distintas alturas registrado a lo largo del año 2021 en la zona de estudio en isla Decepción.

Por otro lado, la balanza de nieve fue capaz de detectar el incremento del peso de la nieve a medida que aumentaba el espesor, que no siempre ha podido ser registrado por los problemas de alimentación mencionados. En todo caso, se observa como ese incremento alcanza su máximo a finales de octubre de 2021, con valores de algo más de 200 kg/m² (Fig. 17), valor ligeramente superior al alcanzado en el año 2020 de 150 kg/m².

Aunque no se tienen datos de espesor de nieve durante el invierno, la relación entre espesor y peso (ver acoplamiento entre los datos en las nevadas que ocurren en abril y mayo de 2021, Fig. 17) hace pensar que el valor máximo de espesor observado en los datos en torno a mediados de octubre, podría ser el máximo de espesor registrado en esta estación, de unos 60 cm. Este valor es coherente con lo observado en los termónivómetros próximos a la estación nivométrica (Fig. 3).



Figura 17: 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, afectando especialmente al sensor de espesor de nieve.

A pesar de los fallos en la alimentación registrados durante el invierno de 2021, los datos de la estación nivométrica apuntan a menores acumulaciones de nieve a lo largo de ese año, alcanzándose espesores menores que en años anteriores. El periodo de acumulación del manto permanente ocurrió en julio, incrementándose de nuevo entre septiembre y octubre (Fig. 17). El periodo de descongelación se inició a final de octubre, con algunas nevadas primaverales, hasta la completa y rápida fusión a principios de diciembre de 2021.

Imágenes fenomenológicas

De las 6 cámaras fenomenológicas instaladas en el entorno de los sitios CALM en las islas Livingston y Decepción, 3 de ellas presentaron fallos diversos que llevaron a la ausencia de imágenes, o a su invalidez. Sin embargo, las imágenes disponibles (Fig. 18 y Fig. 19) permiten estudiar la evolución de las condiciones y fenómenos meteorológicos día a día.

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, muy rápidamente, hasta el final del invierno, a principios de diciembre. En concreto, el 13 de diciembre quedarían ya libres de nieve todos los termónivómetros instalados en la zona del CALM Limnopolar Lake, y el 20 de diciembre en la zona del CALM Crater Lake (Fig. 3). En este último, la estación nivométrica quedaría libre de nieve el 3 de diciembre, de acuerdo con los datos registrados en ella (Fig. 17).

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, sí lo es conocer el tipo de condiciones ambientales que se dan en esos días. En el año 2021 se han detectado muchos menos días que en 2020 en los que las lentes han estado cubiertas de nieve, relacionado con una menor incidencia de las tormentas de nieve. Esta observación es coherente con un menor espesor de nieve de entre 50 y 80 cm registrado este año en las zonas de estudio.

Por otro lado, y aunque no es objeto de investigación de estas estaciones, es posible observar en las fotos de algunas de las cámaras, el estado de Puerto Foster y su caleta Balleneros, detectándose la formación de la banquisa y su desaparición entre junio y agosto, lo que permite entender las condiciones también del mar más próximo a la zona de estudio. De la misma manera, en las fotografías también se observan líquenes para los que podría estudiarse las condiciones a las que se encuentran sometidos.



Figura 18: Imágenes tomadas por las cámaras fenomenológicas instaladas en la zona del CALM de Crater Lake en isla Decepción, por la cámara antigua (arriba) y modernas (centro y abajo) instaladas, estas últimas en puntos opuestos de la malla CALM.



Figura 19: Imágenes tomadas por las cámaras fenomenológicas instaladas en la zona del CALM de Limnopolar Lake en isla Livingston, tomadas por la cámara antigua (arriba) y modernas (centro y abajo) instaladas, estas últimas para observar el CALM desde distintos puntos.

El estudio de las imágenes de las cámaras fenomenológicas requiere de un largo proceso de preparación y análisis, con software específico y sistemas de información geográfica, para poder derivar productos como mapas diarios de cobertura nival o análisis del tipo de cobertura del manto de nieve (ej., Gallego, 2017).

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. Debido a las limitaciones de la campaña, estos datos se han tomado únicamente en el sector de Crater Lake, en isla Decepción.

- **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. 6), 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 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 bandeado muy marcado a lo largo del 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.

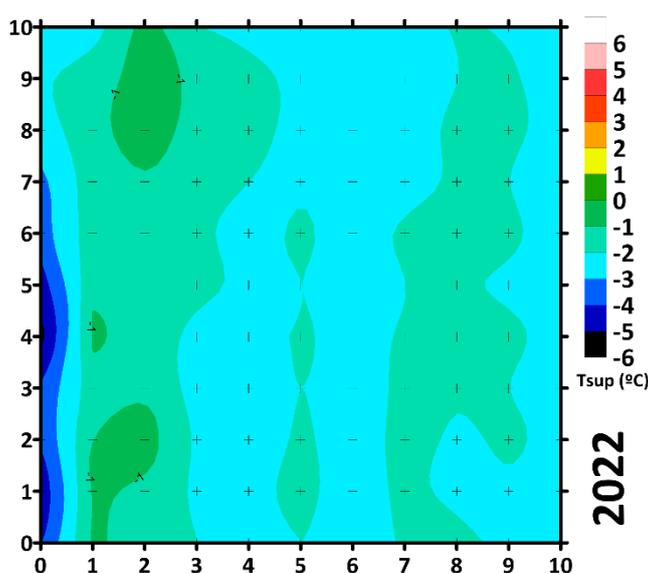


Figura 20: Temperatura superficial por infrarrojos medida en los nodos de la malla CALM de Crater Lake en isla Decepción, Antártida.

Planes de futuro

Mantenimiento de las estaciones

Tras la realización de la campaña 2021-22, se prevén las siguientes necesidades de mantenimiento en las estaciones PT y CALM:

Limnopolar Lake:

- Retirada de la cámara fotográfica automática CC640 ya obsoleta.
- Reinstalar las piquetas que delimitan el perímetro del sitio CALM, midiendo las diferencias de distancia.

Domo:

- Instalar sonda termométrica en sondeo
- Instalar termonivómetro

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*

Sofía:

- Instalar sonda termométrica *Geoprecision* en sondeo de 80 cm

Crater Lake:

- Asegurar la estación nivométrica con piquetas metálicas clavadas en el permafrost para evitar problemas de volcado.
- Reemplazar la batería de la estación nivométrica
- Reinstalar sensores de temperatura de superficie distribuido
- Reinstalar sensores de termonivómetros 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 dispositivos *Geoprecision* M-Log5W-Cable y M-Log5W-String

Plan de mejora

Una vez iniciado 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, puedan pendientes los siguientes experimentos, por orden de prioridad:

- Nivómetros
- Temperatura superficial distribuida
- Movimiento de la capa activa

Por cuestiones presupuestarias, no podrán abordarse todas estas mejoras en una sola campaña. Los nivómetros podrían instalarse mediante el uso de dispositivos M-Log5W-String de *Geoprecision GmbH* funcionando como termonivómetros. Sin embargo, su coste es muy elevado, y la resolución baja. Por ello, se plantea el desarrollo de un prototipo que emplee este tipo de registradores *Geoprecision*, pero con sensores de ultrasonido para la toma de datos de alta resolución posiblemente del fabricante *MaxBotix*. De esta forma se pasaría del cálculo aproximado del espesor inferido a través de datos de temperatura del aire a distintas alturas, a la medida directa del espesor. Esta opción requiere del desarrollo de un prototipo para la red PERMATHERMAL por parte de *Geoprecision GmbH*, con quien se está en contacto para ello.

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 dispositivos M-Log5W-Cable, desde esta campaña ya en uso para la medida de la temperatura superficial en las estaciones PT.

En el tercer caso, también se plantea el uso de dispositivos *Geoprecision*, con adaptación para el uso de inclinómetros. Se está en contacto con el fabricante para abordar esta cuestión y ver la viabilidad de su uso en la red PERMATHERMAL.

Este plan de mejora deberá realizarse en una o dos campañas máximo, con el fin de reducir al máximo las complejidades logísticas de la instalación y el mantenimiento. Sin embargo, el alto coste no hará posible completar este plan de mejora hasta dentro de tres campañas.

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. 83 de la LOU 6/2001 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 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 agradecemos especialmente a los grupos de la Universidad de Cádiz (Amós Gil, Belén Rosado y Carlos González) y del IGN (Rafael Abella y Anselmo Fernández) por la toma de datos de espesor de la capa activa en el CALM de isla Decepción.

Referencias

- de Pablo, M., 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. 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., 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., 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.
- 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.
- 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
- 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

Anexo I: Acrónimos

| | |
|---------|--|
| 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 |
| 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</i> (antes TSP) |
| TSP | <i>Thermal State of Permafrost</i> |
| UAH | Universidad de Alcalá |
| UL | <i>Universidade de Lisboa</i> |
| UTM | Unidad de Tecnología Marina |

