PERMATHERMAL

SERIE TEMPORAL

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

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

Informe de campaña 2020-21

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: Septiembre 2021
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 ha aplicado a la contratación de la Universidad de Alcalá, a través de un contrato Art.83 Ley Orgánica 6/2001 de 21 de diciembre (ref. 141/2021 y código 2020/00553/001) que ha tenido por objeto la realización de las actuaciones correspondientes.

Cite este documento como:
de Pablo, M.A. 2021. Maintenance of TSP 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. 46 pp. DOI: 10.5281/zenodo.5020140

Equipo investigador

Universidad de Alcalá

ACMA
Agua, Clima y Medio Ambiente

PERMATHERMAL
Universidad de Alcalá

Redes internacionales

IPA

GTN-P
Global Terrestrial Network for Permafrost

CALM

SoilTemp

Financiación y logística

Comité Polar Español

UTM
Unidad de Tecnología Marina

CSIC
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Gobierno de España
Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades

Gobierno de España
Ministerio de Defensa

CONTENIDO

Introducción 1
Antecedentes 1
La campaña 2020-21 5
Estaciones 6
Localización 6
Parámetros 7
Mediciones 9
Mantenimiento 9
Datos 10
Instrumentación 12
Estaciones TSP 12
Temperatura del aire 12
Temperatura de la superficie 12
Temperatura del terreno 13
Espesor de nieve 14
Estaciones automáticas 14
Estaciones CALM 15
Espesor de la capa activa 15
Temperatura del techo del permafrost 16
Temperatura superficial 16
Espesor de cubierta nival 16
Otros instrumentos 17
Cámaras fenomenológicas 17
Estación nivométrica 18
Campaña antártica 2020-21 20
Desarrollo de la campaña 20
Desarrollo general 20
Calendario de campaña 20
Condiciones meteorológicas 21
Personal investigador 21

Desarrollo de las tareas 22
Consecución de objetivos 23
El estado de las estaciones 24
Mantenimientos realizados 25
Cambios de instrumentación 25
Retirada de instrumentación 25
Instalación de nuevos instrumentos 26
Incidencias 26
Datos del año 2020 27
Generalidades 27
Disponibilidad de datos 27
Temperatura del Aire 30
Temperatura de la nieve 31
Temperatura de la superficie 32
Temperatura del terreno 33
Espesor de la capa activa 34
Temperatura del techo del permafrost 35
Temperatura superficial distribuida 36
Espesor de cubierta nival distribuida 37
Parámetros nivométricos 38
Imágenes fenomenológicas 41
Otros datos 43
Planes de futuro 45
Mantenimiento de las estaciones 45
Plan de mejora 46
Agradecimientos 47
Referencias 48
Anexo I: Acrónimos 49

Introducción

Antecedentes

Los estudios relacionados con los suelos congelados en la Antártida por parte de investigadores de la Universidad de Alcalá comenzaron a finales de los años 80 del pasado siglo XX con las expediciones realizadas por el hoy Catedrático Dr. Miguel Ramos, adscrito a la Unidad de Física de dicha Universidad. En esas expediciones, realizadas con el programa antártico argentino en la isla Decepción, pudo observar el interés por el estudio de la micrometeorología y su efecto en los suelos congelados. Consecuencia de ello, en el año 1990 se inicia el estudio del permafrost en sentido estricto, abriendo así una línea de investigación novedosa en España. Los primeros trabajos de campo se realizan en la isla Livingston, fruto de la cooperación con equipos españoles del CSIC y franceses del CNRS y gracias a la financiación por el Plan Nacional de I+D+I (proyecto ANT-1263/91, el que sería el primer proyecto en España en el que aparece el término "suelo permahelado"). Gracias a aquellas expediciones de la década de los 90 se consolida la línea de investigación para el estudio de los suelos congelados en las islas antárticas, así como en diversos puntos de la península Ibérica. Estas investigaciones se desarrollan principalmente con profesores de la Universidad de Alcalá asociados al grupo de investigación de Física Ambiental coordinado por el Dr. Miguel Ramos, pero con el que colaboran investigadores de otros centros y universidades, tanto españolas (Universidad de Extremadura, Universidad Complutense, Universidad de Barcelona e Instituto Pirenaico de Ecología) como extranjeras. En particular, en los años 2000 y 2001, colabora con un joven investigador de la Universidad de Lisboa, Dr. Gonçalo Vieira (en ese momento aún estudiante de doctorando). Es en esos años cuando se realizan las primeras perforaciones en el Monte Reina Sofía de la isla Livingston y en las proximidades de la Base Antártica Española Juan Carlos I (BAE JCI), situada al pie de dicho monte. Esto fue posible gracias a la financiación por parte del Programa Antártico Español del Plan Nacional de I+D+I (proyecto ANT98-057 y REN2001-5082-E/ANT). Estas perforaciones se dotaron de sensores térmicos para el control de las temperaturas del permafrost, convirtiéndose en el germen de nuevos proyectos dirigidos a establecer una red más amplia de estaciones de medida de las temperaturas.

Así, en el año 2006, se inician el proyecto PERMAMODEL (POL2006-01918) por parte de investigadores del Grupo de Física Ambiental de la UAH, en colaboración con la Universidad de Lisboa y la Universidad de Zurich (proyecto CGL2007-28729-E), con el que comienza a establecerse algunas estaciones para el control térmico de los suelos congelados en las islas Livingston y Decepción, siguiedo 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) 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). Es poco después, en el añó 2008, cuando 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. Estas perforaciones se realizaron en colaboración del equipo del (en ese momento ya) Dr. Gonçalo Vieira, profesor de la Universidad de Lisboa y con la ayuda financiera de la *Fundação Calouste Gulbenkian* de Portugal.

También el año 2008 se incorpora al equipo de investigación el profesor de la Unidad de Geología de la Universidad de Alcalá, Dr. Miguel Ángel de Pablo (en ese momento aún estudiante de doctorado), quien, en el año 2009 realiza la primera campaña antártica, en el contexto del Año Polar Internacional. En esa campaña tiene el encargo de, por una parte, colaborar en la realización de nuevas perforaciones, de 5 metros de profundidad, en la isla Decepció; y por el otro, de crear una estación TSP y otra CALM en la península Byers de la isla Livingston, una zona antártica especilmente protegida (ZAEP). Las perforaciones en la isla Decepción se realizaron 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). Las estaciones en península Byers se realizan por invitación del investigador Dr. Antonio Quesada de la Universidad Autónoma de Madrid (investigador principal del proyecto POL2006-06635). El interés de este despliegue de instrumentación se enmarca en los esfuerzos internacionales por aumentar el número de

estaciones para el estudio del permafrost en la Antártida, uno de los retos del Año Polar Internacional 2007-2008. Tras ello, en el año 2010 se inicia las tareas de homogeneización y estandarización de las mismas, tanto en los protocolos de medida como los de descarga y procesado de datos. Esto fue posible gracias a la financiación de los proyectos CGL2008-02042-E/ANT, PERMAPLANET (CTM2009-10165) y ANTARPERMA (CTM2011-15565-E), y al apoyo de un entonces recién licenciado en Ciencias Ambientales, hoy Dr. Antonio Molina Jurado, quien realiza campañas durante cuatro años colaborando en las tareas de estandarización.

En el año 2015, disuelto el Grupo de Investigación en Física Ambiental, 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. Dicho mantenimiento se compatibiliza con el desarrollo de del proyecto de investigación PERMASNOW (CTM2014-52021-R) centrado en el estudio 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. Finalmente, en el año 2020 se produce el relevo definitivo en la dirección de la red PERMATHERMAL, quedando bajo la dirección de Dr. Miguel Ángel de Pablo, que también pasa a ser el representante de España en la red GTN-P.

En estos últimos años, y con vistas a la automatización de las estaciones, se comienzan a realizar pruebas de comunicaciones vía radio, primero entre una de las estaciones y la Base Antártica Gabriel de Castilla en la isla Decepción, y posteriormente entre ésta y territorio nacional, gracias a los proyectos de invernada de esta base, y a la incorporación al equipo PERMATHERMAL del profesor Dr. Manuel Prieto, experto en telecomunicaciones y electrónica, y en lo que se continúa trabajando en la actualidad.

Como se ha descrito, durante todos estos años ha existido una estrecha colaboración con el equipo de estudio de permafrost del Dr. Gonçalo Vieira de la Universidad de Lisboa, continuándose el apoyo mutuo para el manteniento de las estaciones y el analisis 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.

El resultado de estas décadas de instalación y mantenimiento de estaciones para el control del permafrost y de la capa activa, en la actualidad la red PERMATHERMAL cuenta con 2 estaciones CALM y 14 estaciones TSP, además de una estación nivométrica, y 4 cámaras fenomenológicas, y algunos otros instrumentos tomando datos en las duras y complejas condiciones antárticas.

Como se ha indicado anteriormente, las estaciones de esta red de monitorización fueron implantándose y dotándose de instrumentación gracias a los consecutivos proyectos financiados por el Gobierno de España en las distintas convocatorias de proyectos de investigación del plan nacional de I+D+I, hasta el año 2015, cuando estas estaciones de monitorización de los suelos congelados pasan a ser considerados como Series Temporales Históricas por el Comité Polar Español, pasando este organismo a financiar el mantenimiento de las estaciones mediante convenios y contratos entre el Instituto Geológico y Minero del España (IGME) en un primer momento, y la Unidad de Tecnología Marina (UTM) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) posteriormente.

En la actualidad, los datos de la red PERMATHERMAL, además de en el preceptivo Centro Nacional de Datos Polares (CNDP), y en la base de datos internacional específica para datos de permafrost y capa activa GTN-P, se están comenzando a integrar en otras bases de datos internacionales con fines distintos del estudio del permafrost, como es la red SoilTemp para el análisis de la temperatura superficial en estudios de ecología. También se está trabajando en la actulidad en integrar las imágenes de las cámaras fenomenológicas en la base de datos del proyecto PhenoCam de la Fundación Nacional para la Ciencia (NSF) de los Estados Unidos. Adicionalmente, están comenzando a volcarse los datos en un repositorio abierto a nivel internacional para datos científicos, ZENODO, donde se ha creado una comunidad con el nombre de la red, PERMATHERMAL, que albergará también los datos recuperados en sus distintos niveles de preprocesado, y los productos resultantes, así como documentos e informes técnicos.

La campaña 2020-21

En el citado contexto, la campaña 2020-21 para el mantenimiento de las estaciones 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 de los sensores instalados en las distintas estaciones, y que han estado midiendo durante el año 2020.
- Programación e instalación de sensores.
- Reposición de sistemas de detección en caso de daños o fallos.
- Mantenimiento de los sistemas de soporte y alimentación de energía.
- Mantenimiento de las cámaras fotográficas automáticas y reposición de tarjetas de memoria y reenfocado.
- 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 2020-21 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

Como resultado de todos estos años de trabajo e investigación, en la actualidad existen 13 estaciones para el control térmico de los suelos (TSP) en 10 ubicaciones (Tabla 1) y 2 estaciones para el control del espesor de la capa activa (CALM) (Tabla 2), repartidas por las penínsulas Hurd y Byers de la isla Livingston y en el entorno de Crater Lake en la isla Decepción (Figura 1). Además, existen otras estaciones similares situadas en las mismas islas, pertenecientes a la red PERMANTAR del grupo de investigación del Dr. G. Vieira, de la Universidad de Lisboa, y que ocasionalmente son mantenidas por investigadores del equipo PERMATHERMAL.

Tabla 1: *Localización de las estaciones TSP en las islas Livingston y Decepción, Antártida.*

ESTACIONES TSP	COORDENADAS		OBSERVACIONES
Isla Livingston:			
Península Byers:			
Limnopolar Lake	62°38’59.100"S	61°06’16.900"W	ZAEP nº 126
Península Hurd:			
BAE Juan Carlos I	62°39'48.815"S	60°23'26.484"W	
Nuevo incinerador	62°39'50.744"S	60°23'09.061"W	
Incinerador	62°39'52.980"S	60°23'08.079"W	
Morrena	62°40'01.671"S	60°22'31.430"W	
Collado Ramos	62°40'03.063"S	60°23'31.504"W	
Glaciar	62°40'09.339"S	60°22'50.949"W	
Monte Reina Sofía	62°40'15.657"S	60°22'46.468"W	
Isla Decepción:			
Crater Lake	62°59'06.845"S	60°40'45.225"W	
Cerro Caliente	62°58'27.200"S	60°42'38.700"W	ZAEP nº 140

Tabla 2: *Localización de las estaciones CALM en las islas Livingston y Decepción, Antártida.*

ESTACIONES CALM	COORDENADAS		OBSERVACIONES
Isla Livingston:			
Península Byers:			
Limnopolar Lake	62°38’59.100"S	61°06’16.900"W	ZAEP nº 126
Isla Decepción:			
Crater Lake	62°59'06.845"S	60°40'45.225"W	

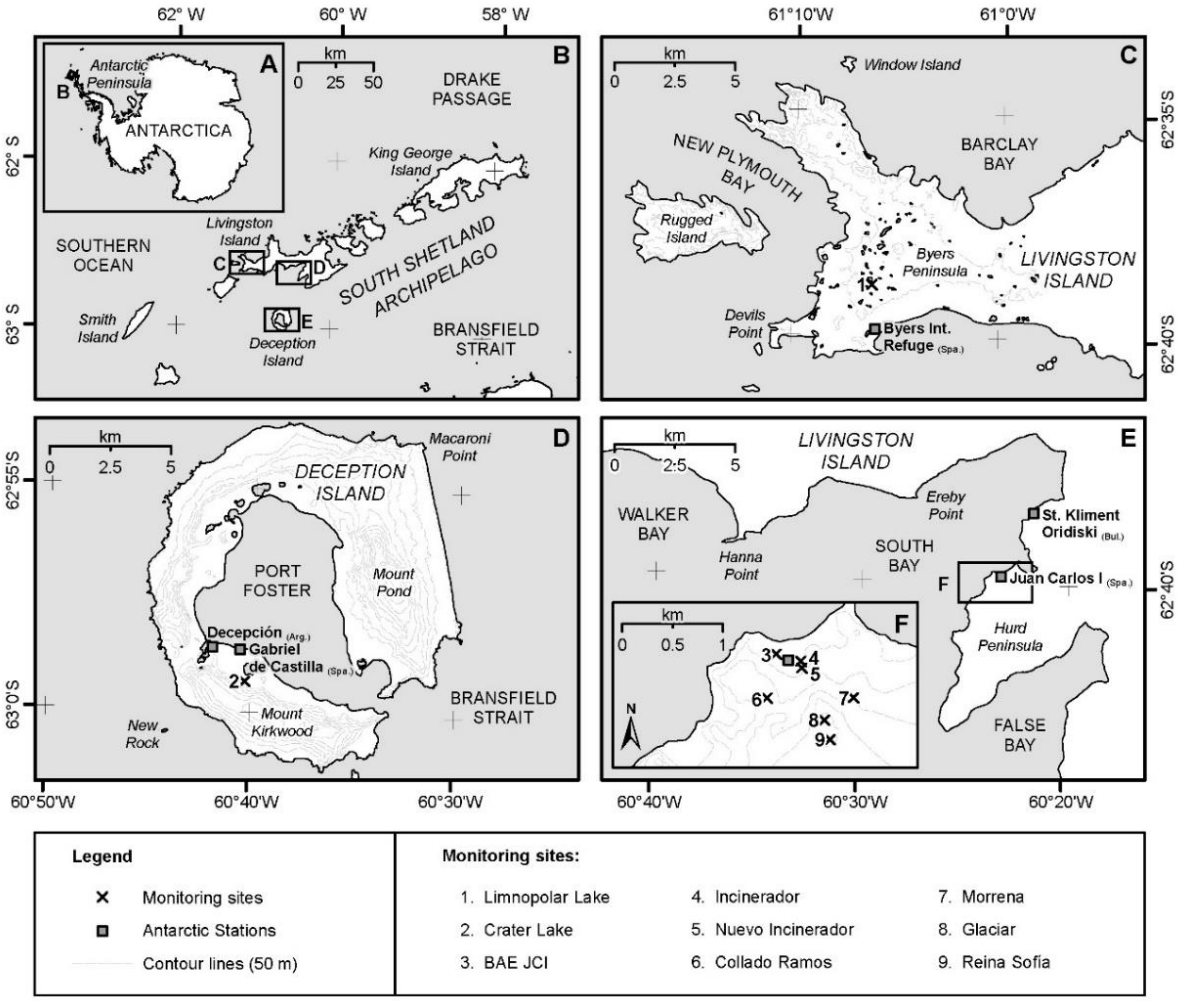

Figura 1: *Mapa de localización de las estaciones de monitorización del estado térmico del permafrost y el espesor de la capa activa que constituyen la red PERMATHERMAL situadas en distintos lugares de las islas Livingston y Decepción, Antártida (Tomado de de Pablo et al., 2016).*

Parámetros

Cada una de estas estaciones TSP 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.

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 TSP 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 (Modificado de de Pablo et al., 2020).*

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

En general, las estaciones TSP (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 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; (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 TSP 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 TSP y CALM requieren de visitas anuales a las mismas y la realización de una serie 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.

Finalmente, las duras condiciones ambientales en la zona de estudio de la Antártida requieren de la realización de una serie de 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 TSP y CALM son, en general, almacenados en ficheros de texto plano en formato ASCII, cuyo nombre está codificado con la siguiente estructura:

Localización_Sitio_instrumentación_identificador_Altura/profundidad_año.extensión
XXX_XX_XXX_XXXXX_XXXXcm_XXXX.XXX

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

Localización:

LIV	Isla Livingston
DEC	Isla Decepción

Sitio:

JC	BAE Juan Carlos I
NI	Nuevo Incinerador
IN	Incinerador
CR	Collado Ramos
MO	Morrena (anteriormente Motos)
GL	Glaciar
SO	Sofía
LL	Limnopolar Lake
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 TSP

Las estaciones 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, y 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 vienen 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 encuentran 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 son de tipo *TinyTag Plus 2* de *Gemini*, cuya resolución de medida de la temperatura es de 0,01ºC y una precisión de 0,04ºC. Toman 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.

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.

El dispositivo de medida es generalmente un registrador de datos *iButton Thermocron* modelo *DS1922L* de *Maxim*, cuya resolución es de 0,0625ºC, si bien su precisión es de 0,5ºC. Estos dispositivos, si bien aguantan una cierta exposición a las condiciones ambientales, no son estancos, por lo que se encuentran dentro de una cápsula modelo *DS9107+* del mismo fabricante, que es la que está 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 4096 medidas, por lo que están programados para la toma de datos cada 3 horas, con el fin de asegurar que registran datos durante al menos un año.

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, generalmente registradores de datos *iButton Thermocron* modelo *DS1922L* de *Maxim*, cuya resolución es de 0.0625ºC y precisión de 0.5ºC, 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 son 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 son 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.

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 menores resolución, precisión y memoria solo admitían medidas cada 4 horas para poder cubrir un periodo de un año. Desde 2010, todos los termonivómetros 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.

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.

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 realiza 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.

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 TSP). 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 TSP, 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 TSP 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.

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 registrado 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 termonivómetros 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 (%)
Pirgeometro 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 2020-21

Desarrollo de la campaña

Desarrollo general

La Campaña Antártica Española 2020-21 se ha desarrollado en un escenario de alta complejidad 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 el 11 de marzo de 2020 hasta el 8 de mayo de 2021, con las consiguientes complejidades logísticas y sanitarias.

Esta situación de pandemia supuso una complicada logística de la campaña, pasando por la realización de pruebas PCR 72 horas antes del inicio del viaje, o la realización de cuarentenas de 14 días en Punta Arenas (Chile), durante el tránsito hacia la Antártida, además de un sinfín de medidas menores de seguridad sanitaria y mantenimiento de las distancias sociales.

Un brote de COVID-19 a bordo del BIO Hespérides nada más comenzar éste su tránsito desde territorio nacional hacia la Antártida supuso un radical cambio de los planes iniciales de movimientos de personal científico y de actividades en las bases antárticas españolas.

Calendario de campaña

Como resultado de ello, sólo los investigadores de las Series Temporales, incluyendo la serie temporal PERMATHERMAL, y de dos proyectos de investigación que ya habían iniciado el viaje hacia la Antártida, pudieron realizar finalmente actividades durante la campaña antártica. Además, el periodo para el desarrollo de las actividades ligadas al mantenimiento de las estaciones de la red PERMATHERMAL sobre el terreno se vio fuertemente reducido, quedando inicialmente limitado a 14 días de actividad en la Isla Decepción, unas horas en península Hurd de la isla Livingston, y sin actividad en península Byers, en esa misma isla.

De esta forma, la campaña se desarrolló entre los días 14 de enero y 11 de marzo de 2021, con los siguientes hitos:

- 14 de enero: Salida de España
- 15 de enero: Llegada a Punta Arenas (Chile) e inicio de la cuarentena

- 1 de febrero: Fin de la cuarentena y embarque en el B/O Sarmiento de Gamboa rumbo a la Antártida
- 7 de febrero: Llegada a Isla Decepción e inicio de tareas
- 24 de febrero: Embarque en el B/O Sarmiento de Gamboa
- 25 de febrero: Llegada a península Hurd, isla Livingston, y realización de tareas. Embarque definitivo en el B/O Sarmiento de Gamboa
- 5 de febrero: Llegada a Punta Arenas (Chile) a bordo del B/O Sarmiento de Gamboa y alojamiento en Hotel a la espera de iniciar viaje de regreso
- 8 de Marzo: Realización de prueba PCR
- 10 de Marzo: Salida en avión de Punta Arenas (Chile)
- 11 de Marzo: Llegada a España

Condiciones meteorológicas

A las complejidades logísticas y sanitarias de la campaña hubo que añadir las dificultades meteorológicas, al desarrollarse toda la campaña en un periodo de fuertes y constantes vientos que complicaba las tareas. 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 (12 campañas previas) y en el mantenimiento de las estaciones TSP y CALM, como para poder desarrollar las labores requeridas en ese territorio con las añadidas condiciones existentes en la campaña 2020-21. 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

A pesar de lo ajustado del calendario final de campaña y a las condiciones meteorológicas, el equipo investigador desplazado a la zona de estudio pudo realizar el mantenimiento de las estaciones TSP y CALM situadas en la isla Decepción, así como en la península Hurd de la isla Livingston, si bien, en este último caso, con la colaboración del Jefe de Base y Técnicos de la Base Antártica Española Juan Carlos I. Debido a los cambios del calendario inicial, no se pudo realizar el mantenimiento de las estaciones TSP y CALM situadas en la península Byers de esa misma isla, quedando, por tanto, sin datos disponibles del año 2020 y sin conocer el estado de las estaciones y los sensores.

En el desarrollo de la campaña fue fundamental la cooperación, por un lado, de la dotación de la Base Antártica Española Gabriel de Castilla, donde se realizó una estancia de 18 días, del 7 al 24 febrero de 2021. En esta fase de la campaña, el investigador fue acompañado por un miembro de la dotación con el fin de colaborar en las tareas de mantenimiento que permitieron acelerar el cumplimiento de las tareas de volcado de datos y de mantenimiento de las estaciones, así como de la toma de datos *in situ*.

Durante la estancia en la isla Decepción se realizó el mantenimiento de todas las estaciones situadas en la misma, incluyendo algunas estaciones TSP 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 experimentos que, aunque de interés, aportaban los sensores necesarios para realizar el cambio de sensores en las estaciones situadas en la península Hurd de la Isla Livingston.

Por otro lado, también fue fundamental la colaboración del Jefe de Base y dotación de la Base Antártica Juan Carlos I, ya realizaron una parte importante de las tareas de mantenimiento de las estaciones. Debido al cambio de calendario, la estancia del investigador desplazado a zona quedaba reducido a unas horas, en concreto durante el periodo de cierre de base. En este escenario es materialmente imposible realizar todo el mantenimiento de las estaciones y el volcado de datos. Por ello, el jefe y técnicos de la base realizaron una revisión del estado de cada una de las estaciones informando al investigador por medios telemáticos. Gracias a estas comunicaciones, fue posible establecer cuáles

podrían ser las tareas de recuperación de las estaciones dañadas durante el invierno. Estas tareas fueron realizadas por los técnicos de la base e incluyeron, como se verá más adelante, la reparación de mástiles, tensado de vientos, reparaciones eléctricas y metalúrgicas, etc. De esta forma, mientras el investigador realizaba las tareas de mantenimiento de las estaciones situadas en la isla Decepción, los técnicos de la base en isla Livingston realizaban el mantenimiento de las situadas en la península Hurd.

El resultado fue tan exitoso, que, durante el periodo de estancia del investigador en península Hurd, reducido a unas pocas horas, se pudo hacer la recuperación de los sensores instalados en el año 2020 y la reposición de los nuevos en una sola jornada de trabajo durante la que se recorrieron todas las estaciones, gracias a su proximidad a la Base Antártica Española.

Parte del éxito radica también en que los sensores instalados fueron programados previamente en isla Decepción antes de la partida del investigador hacia isla Livingston, y el volcado de datos de los sensores recuperados fue realizado a bordo del B/O Sarmiento de Gamboa antes de iniciar la navegación de regreso a Punta Arenas (Chile). Si bien, esta operación supuso, como se ha comentado previamente, el sacrificio de experimentos en isla Decepción, con el fin de poder utilizar los sensores no instalados en dichos experimentos, en los instrumentos de las estaciones en isla Livingston. Aunque no se trataba de experimentos vitales para la red, si lo eran para el entendimiento de los procesos que ocurren en las zonas de estudio y que condicionan la variabilidad observada en el régimen térmico de los suelos.

La falta de financiación de los últimos años, unidos a estos inconvenientes, pone en peligro la continuidad y la calidad de la serie temporal, siendo necesario abordar una renovación de la instrumentación de las estaciones que asegure la toma de datos y su continuidad, a pesar de los contratiempos que puedan surgir para o durante el desarrollo de las campañas antárticas.

Consecución de objetivos

A pesar de todas las complicaciones existentes, se han alcanzado el 90% de los objetivos marcados para la campaña 2020-21, realizándose la toma de datos de 1 de los dos sitios CALM con los que cuenta la red PERMATHERMAL; el volcado de datos de datos de 13 de las 14 estaciones TSP; la recuperación de

imágenes de 3 de las 6 cámaras fenomenológicas instaladas, y de la única estación nivométrica de la red.

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 la estación nivométrica situada en la isla Decepción, que apareció volcada, girada y con algunos daños catastróficos en alguno de los sensores. Otros fallos menores fueron la pérdida de la antena de radio situada en la Estación DECBOR3.

En isla Livingston, en la península Hurd, se observaron graves problemas en una de las estaciones, Nuevo Incinerador, que se encontraba sin el nivómetro (se halló tirado en el suelo algunos metros más allá de su ubicación), y con el mástil de soporte del sensor de temperatura del aire doblado a más de 45º. Una posible avalancha de nieve al final de la primavera podría ser la causa de este deterioro.

En ese mismo entorno, en la estación Glaciar, casi en la cima del Monte Reina Sofía, se encontró tirado en la nieve el mástil con la caja de electrónica y baterías que forma parte del sondeo situado en ese punto. Este problema se debe al continuado descenso del nivel de hielo que se había visto incrementar entre los años 2009 y 2018, y reduciéndose desde entonces. Al encontrarse el mástil clavado en el hielo, al reducirse su espesor, no ha podido soportar el mástil, cayendo este sobre la nieve. Se desconoce si relacionado con este proceso, el registrador de datos situado dentro de la caja, aunque funcionaba aparentemente bien, registró datos inválidos de la cadena de sensores situada en el interior del sondeo de esa estación. Se desconoce la causa de este fallo, que podría no tener que ver con la caída del mástil aquí descrito.

En la estación Sofía, en la cima del Monte Reina Sofía, se encontró que el registrador de datos había ido perdiendo la batería interna, resultando en un retraso paulatino del reloj de tiempo real, acumulándose más de 7 meses de desfase.

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, así como el sellado de los sondeos una vez descargados y reemplazados los sensores.

En el caso de la estación nivométrica, ésta fue puesta en pie, y comprobado el estado de los distintos sensores, así como el recalibrado de los mismos con el fin de comprobar su estado y para dejarlos operativos. Fue necesario reemplazar uno de los sensores rotos para la medida de los parámetros del paquete de nieve a 10 cm del suelo. Por otro lado, al volcarse la estación, ésta cayó sobre el instrumento para la medida del peso de la nieve, quedando una de las placas abolladas. Al no ser la plaza de medida, se procedió a cambiar su posición, dejándola instalada y operativa.

Para evitar otra caída causada por posible s fuertes rachas de viento, la estación se afianzó al terreno mediante piquetas metálicas clavadas en el permafrost, a las que se ataron vientos sujetos a la estación, si bien hay que estudiar otros posibles mecanismos de afianzamiento.

En cuanto a la antena de comunicaciones vía radio de la estación DECBOR3, desaparecida, posiblemente arrancada por el viento, fue repuesta por una nueva, y la electrónica revisada.

Cambios de instrumentación

Retirada de instrumentación

Durante la presente campaña se ha procedido a la retirada de dos experimentos, ambos en la zona de Cráter Lake en isla Decepción, si bien sólo uno se ha retirado de forma permanente, y el otro está pendiente de decisión final.

El experimento retirado de forma permanente es la red de minitermonivómetros situados regularmente en 9 puntos de la mala CALM de Cráter Lake, en el centro, las esquinas y la mitad de cada lado del perímetro. Este experimento, cuyo objetivo era la medida del espesor de nieve de forma distribuida por toda la malla CALM, hacía uso de sensores *iButton* de baja resolución (modelo DS1921G) de los que ya no se disponía de repuestos, y los problemas de financiación hacía inviable su reposición por sensores del mismo

tipo pero de mayor resolución (modelo DS1922L). Esto llevó a la decisión de la retirada del experimento, y con ello, a retirar del terreno las estacas de madera de 50 cm que constituían esta pequeña red de termonivómetros.

Por otro lado, en este mismo sitio CALM se procedió a la retirada de los sensores de temperatura de los 3 termonivómetros de alta resolución instalados durante el desarrollo del proyecto PERMASNOW en 2017. Estos sensores, una vez volcados los datos, no fueron repuestos, sino que se utilizaron para el mantenimiento de las estaciones TSP situadas en la península Hurd de la isla Livingston. Los problemas presupuestarios y la complejidad del calendario de esta campaña hicieron necesario tener que sacrificar este instrumento secundario para disponer de los sensores necesarios para el mantenimiento de los instrumentos primarios de las estaciones TSP en península Hurd. Por tratarse de una razón de fuerza mayor, los mástiles de madera no han sido retirados de su emplazamiento, a la espera de poder volver a disponer de los sensores suficientes para continuar con la toma de datos en ellos.

Instalación de nuevos instrumentos

Durante la campaña 2020-21 se procedió a la instalación de un único experimento: un inclinómetro para el estudio del levantamiento del terreno debido a los procesos de congelación y descongelación del suelo. Este instrumento fue instalado en modo de pruebas en la estación 3 de Cráter Lake, adosado al mástil del termonivómetro de esa estación.

Incidencias

Sin incidencias que destacar en la realización de la campaña Antártica 2020-21 para el mantenimiento de las estaciones TSP y CALM en las islas Livingston y Decepción, Antártida.

Datos del año 2020

Generalidades

Durante la campaña antártica 2020-21 se han recuperado un total de 3,25Gb de datos, en 4154 archivos de un total de 60 experimentos con más de 417 sensores, de los 522 instalados en la zona antártica, incluyendo las fotografías de las cámaras fenomenológicas y la estación nivométrica.

En general, por 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 ha sido más elevada que en años anteriores. Además, las duras condiciones meteorológicas del invierno de 2020 han producido daños y pérdidas de datos en algunos otros sensores e instrumentos. Estos fallos y perdidas 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.

Disponibilidad de datos

La disponibilidad de datos es muy distinta en función de los instrumentos y su emplazamiento 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. A continuación, se describen los datos disponibles de cada tipo de medición:

Temperatura del aire: 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. Esta deriva no parece a priori un fallo del instrumento, sino un comportamiento térmico real, pero es necesario un estudio detallado comparando con los datos registrados por la estación nivométrica. Todos los demás instrumentos han funcionado de forma correcta, a falta de los datos de la estación de la península Byers, que no se han podido recoger por no haberse visitado la zona.

Temperatura de la nieve: Se han producido una gran pérdida de datos de temperatura de la nieve debido a los numerosos fallos de los sensores

individuales (7) que constituyen cada uno de los termonivómetros de la red, no habiendo ningún termonivómetro con todos los sensores operativos, 3 con 6 de 7 sensores operativos, 1 con 4 de 7, 1 con 3 de 7, y 2 con 2/7. Aunque se podrán hacer observaciones sobre la temperatura de la nieve, no se podrán utilizar para obtener productos de espesor de nieve en las estaciones.

Temperatura de la superficie: Debido a las duras condiciones ambientales y la antigüedad de los sensores utilizados, solo se han podido recuperar datos válidos de 4 de los 7 sensores de temperatura superficial de las estaciones de control, además de los datos no recuperados de la estación no visitada en la estación de la península Byers.

Temperatura del terreno: 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 Glaciar en península Hurd, se ha producido un fallo en algún punto de la electrónica que ha impedido tener datos de esta perforación. En el caso de la estación Sofía en la misma región, el fallo de la electrónica ha llevado a la ralentización del reloj interno, resultando en fechas y horas erróneas en los datos registrados, si bien será posible reconstruir la evolución térmica de los suelos.

Espesor de la capa activa: Se ha podido realizar la medición del espesor de la capa activa únicamente en la estación CALM Crater Lake (A16) de la red PERMATHERMAL en isla Decepción, ya que la estación CALM situada en península Byers de la isla Livingston, no pudo ser visitada.

Temperatura del techo del permafrost: 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.

Temperatura superficial distribuida: Han quedado en el terreno los 36 sensores instalados en el CALM Limnopolar Lake, no visitado. De los otros 36 instalados en el CALM de Cráter Lake, solo se han podido recoger 27 debido a que los demás habían desaparecido (por efecto de la fauna local, el viento, etc.), y de ellos, 4 han resultado dañados y no ha sido posible obtener datos de ellos, quedando un total de 23 sensores con datos válidos.

Espesor de nieve distribuida: Los 3 termonivómetros situados en el CALM del Limnopolar Lake no han podido visitarse, por lo que no se dispone de datos de ellos. De los 4 instalados en el CALM de Crater Lake en isla decepción, uno de ellos, ha quedado invalidado al haber caído junto con la estación nivométrica cuando ésta cayó como consecuencia del viento. Los 3 restantes, aunque han presentado fallos en alguno de los sensores, presentan datos válidos de temperatura del aire a distintas alturas, de los que se podrán derivar como producto 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: Aunque se han podido recuperar los datos de la estación nivométrica, ésta fue volcada por el viento 1 de mayo de 2020 siendo muchos de los datos inválidos desde entonces, y registrándose un corte de la energía entre 11 de agosto y el 13 de noviembre de 2020. Sólo los datos de radiación, así como de temperatura y peso de la nieve pueden considerarse válidos para este año, al ser instrumentos independientes de la estación volcada.

Fotografías fenomenológicas: de las 6 cámaras instaladas en la red PERMATHERMAL, sólo pudieron recuperarse datos de las situadas en la isla Decepción, en el entorno de Cráter Lake, recuperándose así fotos de 3 de las cámaras (2 modernas, modelo C5MPX, y 1 antigua, modelo CC640). De la cámara antigua, aunque se recuperaron fotografías correspondientes a todo el año, un posible fallo de alimentación o del reloj de tiempo real interno el 9 de julio de 2020 produjo un reinicio de la fecha y hora, causando que las fechas de las fotografías no puedan relacionarse con el momento real en el que fueron tomadas, detectándose incluso fotografías tomadas de noche. Por ello, aunque hay fotografías desde la mencionada fecha, no son utilizables. Por otro lado, mientras que una de las cámaras modernas funcionó perfectamente durante todo el año, la otra sufrió un corte de alimentación el 21 de junio de 2020, recuperándose el normal funcionamiento el 8 de febrero de 2021. Y en la cámara que funcionó con normalidad, se detectó un cambio de posición en noviembre de 2020, posiblemente como resultado de los fuertes vientos. En total se han recuperado 1345, 568 y 602 imágenes de las cámaras, entre diciembre de 2019 y febrero de 2021.

Temperatura del Aire

Las temperaturas del aire registradas durante el año 2020 (Fig. 2) se mantienen entre los -16ºC de mínima, alcanzados a finales del mes de agosto y principios de septiembre, y los 8ºC alcanzados a finales de enero de 2021. Cabe destacar el pico de calor registrado en febrero de 2020, donde se alcanzaros temperaturas de casi 13ºC en una ola de calor que afectó a todo el sector de la península Antártica.

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

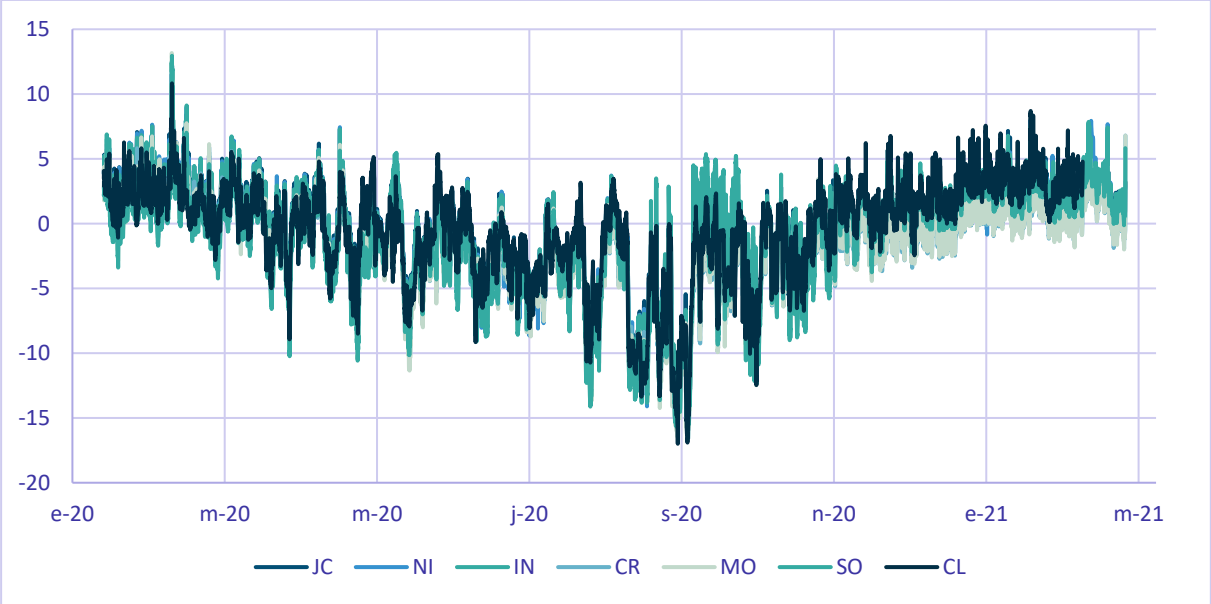

Figura 2: *Temperaturas del aire registradas en las distintas estaciones de la red PERMATERMAL en las islas Livingston y Decepción, Antártida, entre enero de 2020 y febrero de 2021.*

Temperatura de la nieve

La escasez de datos es muy importante este año debido al fallo catastrófico de muchos de los sensores, pero en los casos en los que se han podido recuperar datos de más sensores de cada termonivómetro, 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 mediados de junio, si bien los espesores deben rondar los 40 cm de espesor en muchos de los emplazamientos. La desaparición de la cubierta de nieve se produce en torno a finales de diciembre en la estación del Monte Reina Sofía, la situada a mayor altitud de la red, aunque esta fecha varía de una estación a otra debido a las condiciones locales de orografía, vientos y exposición, que permiten una mayor o menor duración de la cubierta de nieve.

La presencia de periodos de estabilidad de la temperatura a 0ºC 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.

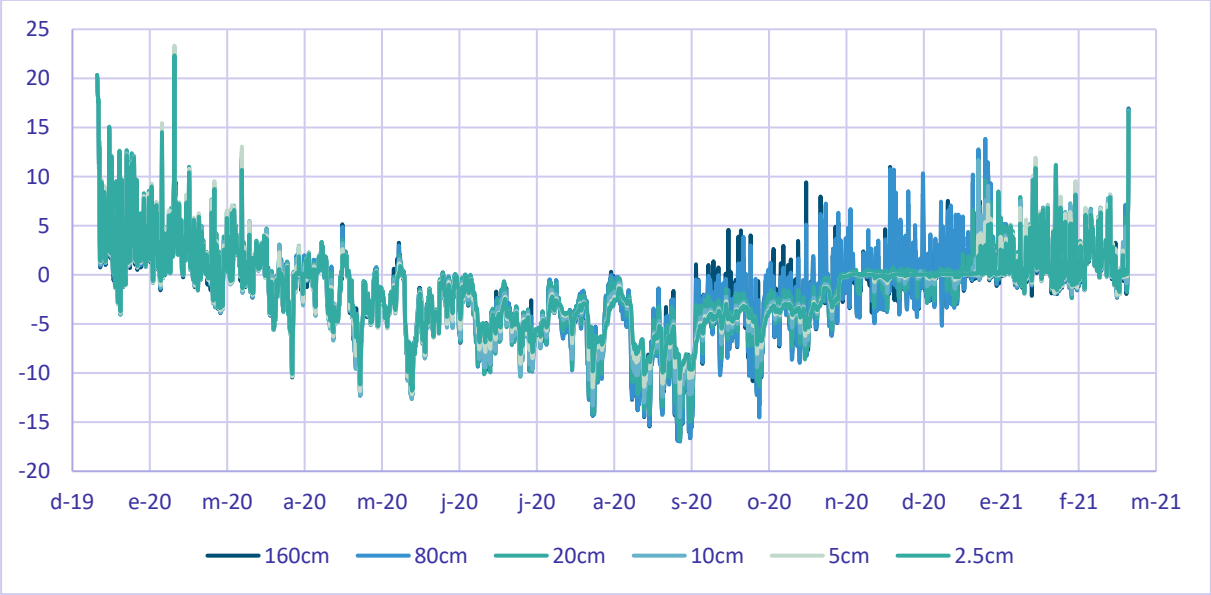

Figura 3: *Temperatura de la nieve en la estación de la cima del Monte Reina Sofía, en la isla Livingston mostrando el distinto comportamiento de la temperatura del aire a distintas alturas sobre el suelo cuando existe una cubierta de nieve.*

Temperatura de la superficie

La temperatura de la superficie del suelo registrada en las distintas estaciones de monitorización (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 estas diferencias ente estaciones no es tan importante, 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. Es también es esta estación donde se registra un final del periodo de congelación más tardío, en enero de 2021, mientas que en el resto de las estaciones se produce a partir de diciembre de 2020. 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 2020.

Las temperaturas máximas del suelo, que alcanzar los más de 23ºC, se alcanzaron en el verano de 2020 en las estaciones situadas a menor cota, mientas que las temperaturas más frías se alcanzaron en las estaciones a cotas intermedias a finales de agosto, con valores de casi -10ºC.

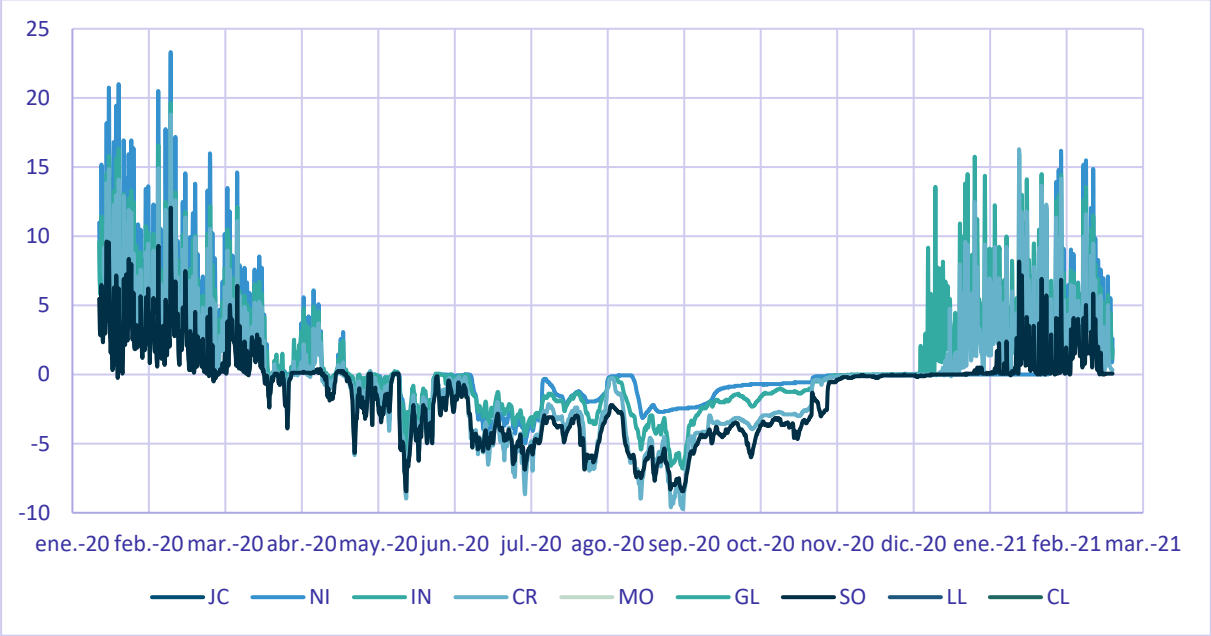

Figura 4: *Temperaturas de la superficie del suelo registradas en 4 de las 7 estaciones de monitorización de la red PERMATHERMAL en las Livingston y Decepción de la Antártida, entre enero de 2020 y febrero de 2021.*

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, registrándose temperaturas de hasta 10ºC en el verano de 2021. Estos datos reflejan también los valores anormalmente altos que se registraron a principios de febrero de 2020, alcanzándose algo más de 10ºC a 5 cm de profundidad. 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 a lo largo del mes de diciembre.

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 alcanzaros a finales de agosto, de hasta -11ºC quedan reflejadas, aunque suavizadas, hasta profundidades importantes, lo que es un reflejo de la sensibilidad del terreno al régimen térmico de la atmósfera.

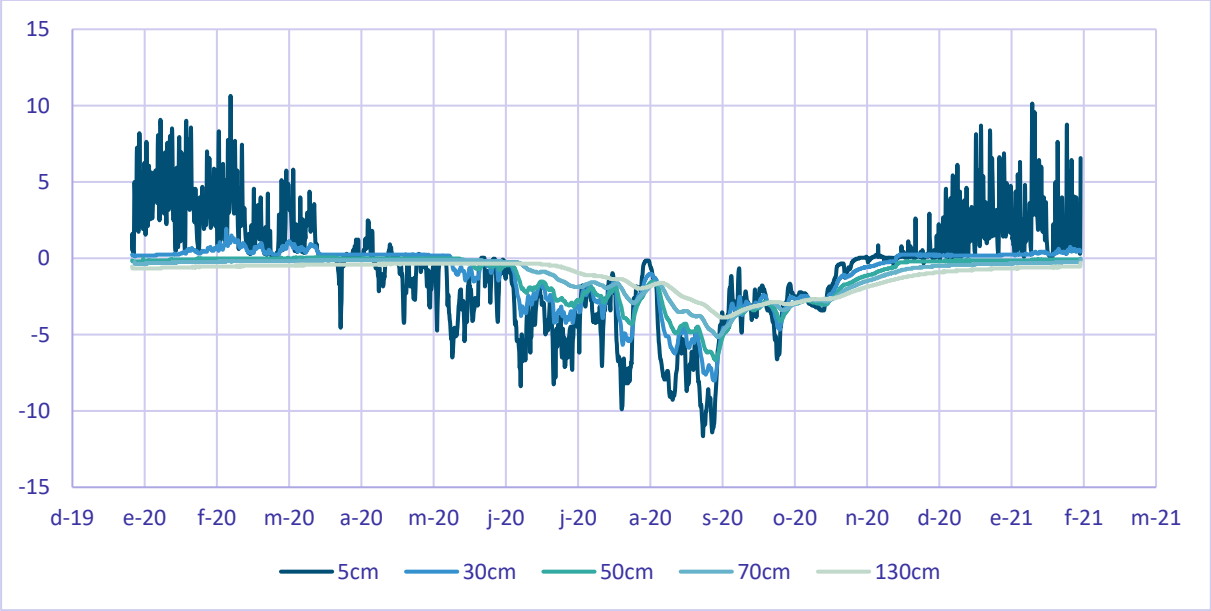

Figura 5: *Datos de temperatura del terreno registrados en el sondeo CL_BOR_3,3 en isla Decepción, entre diciembre de 2019 y enero de 2021.*

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 mediados de febrero de 2021 (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 en la misma fecha, y equiparables a los de años previos, si bien estos se midieron en fechas anteriores (finales de enero y principios de febrero). Es en el año 2017 cuando se registraron espesores menores de capa activa aun midiéndose en fechas posteriores (marzo) a la de la medición realizada en el año 2021.

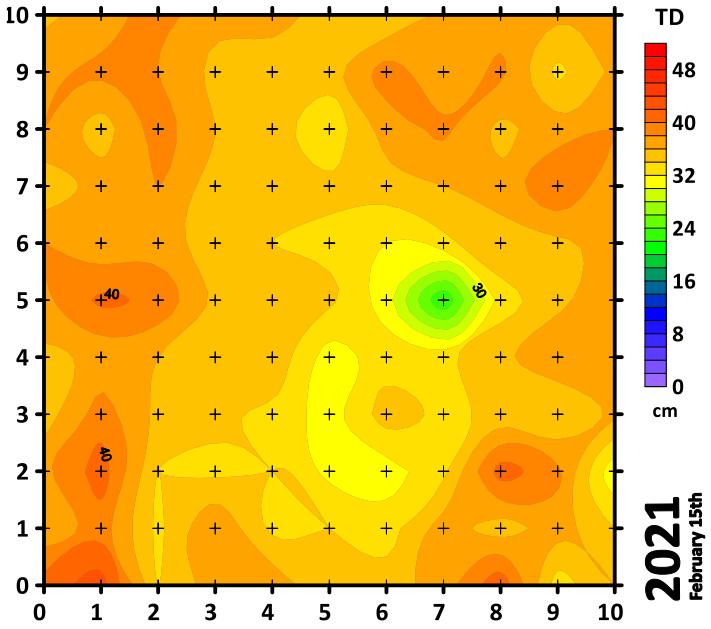

Figura 6: *Mapa de espesor de la capa activa medido en el CALM de Cráter Lake, en isla Decepción, el 15 de febrero de 2021.*

Temperatura del techo del permafrost

Distribuidos en 16 nodos de la malla CALM de Crater Lake en isla Decepción se ha medido la Temperatura del Techo del Permafrost (TTOP). En todos ellos se puede observar temperaturas próximas a los 0ºC durante 7 meses al año (Fig. 7), excepto en los meses de invierno, entre mediados de marzo y principios de diciembre. En este periodo la temperatura del techo del permafrost desciende hasta alcanzar mínimas de hasta -8ºC. Es de destacar que ninguno de los nodos muestra evidencias de la ola de calor del 9 de febrero de 2020.

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 las temperaturas del invierno no mucho menos frías (hasta 3º menos) y menos variables que en el resto. Éste es el caso de los nodos (4,2), (4,4) 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. La excepción a este comportamiento se da en los nodos (2,2), (2,6) y (2,8), que están más expuestos a los vientos y es donde tradicionalmente se alcanzan menos espesores de nieve. Es precisamente en estos nodos donde el incremento de temperaturas al final del invierno es más temprano entre mediados de octubre y mediados de noviembre.

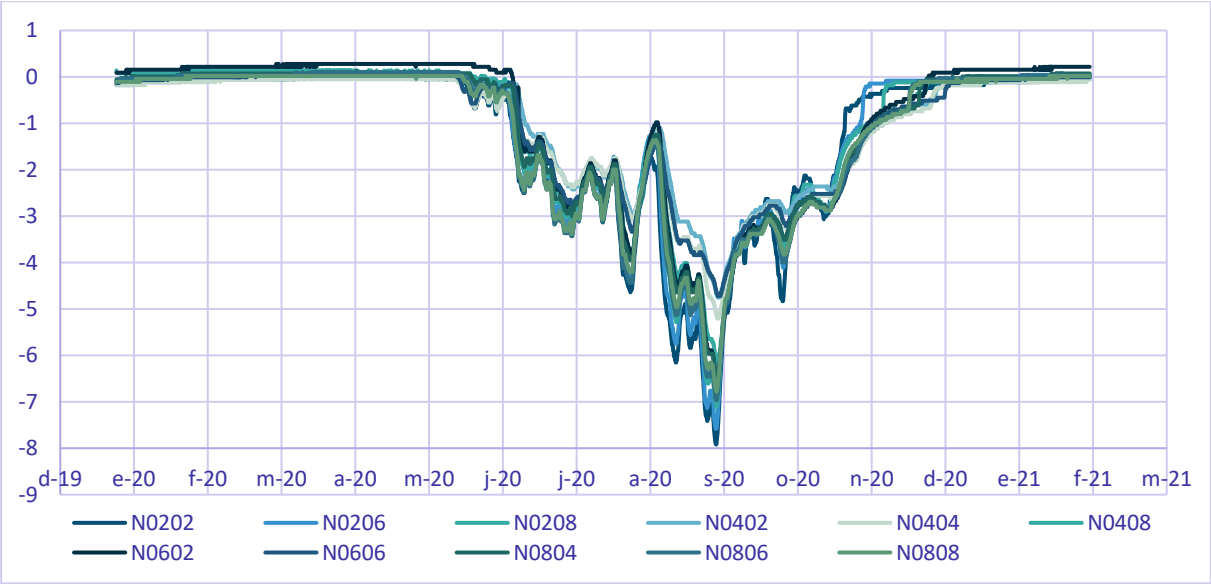

Figura 7: *Evolución temporal de las temperaturas del techo del permafrost en los nodos de la malla CALM de Cráter Lake en isla Decepción, Antártida, entre diciembre de 2019 y enero de 2021.*

Temperatura superficial distribuida

Distribuidos por los nodos pares de la malla CALM de Crater Lake se instalaron sensores de temperatura para la medida de la temperatura superficial distribuida (Fig. 8), de tal manera que permitieran un estudio espacial de las mismas, y el análisis comparativo con los datos de espesor de la capa activa medidos durante la campaña. Los datos disponibles muestran un comportamiento similar al dato de temperatura superficial correspondiente a este emplazamiento (Fig. 4) y, aunque con mayor variabilidad, como los de temperatura del TTOP (Fig. 7).

Cabe destacar la cara determinación del inicio y fin del periodo de congelación entre mediados de marzo de 2020 para todos los nodos, y entre mediados de noviembre y principios de diciembre en función del nodo, indicando una diferente cobertura nival a lo largo del invierno, tal y como re refleja también por la presencia de periodos, más o menos prolongados de periodo isotermos a 0ºC durante el final del periodo de congelación, que se inicia de forma simultánea para todos los nodos a mediados de octubre.

Por otro lado, las temperaturas del periodo de descongelación hasta marzo de 2020 presentan una menor variabilidad que las del periodo de descongelación que se inicia en diciembre de 2020. El pico de calor del 9 de febrero de 2020 no destaca especialmente en ese periodo, si bien se detectan picos térmicos, pero muy inferiores a los detectados en el último periodo.

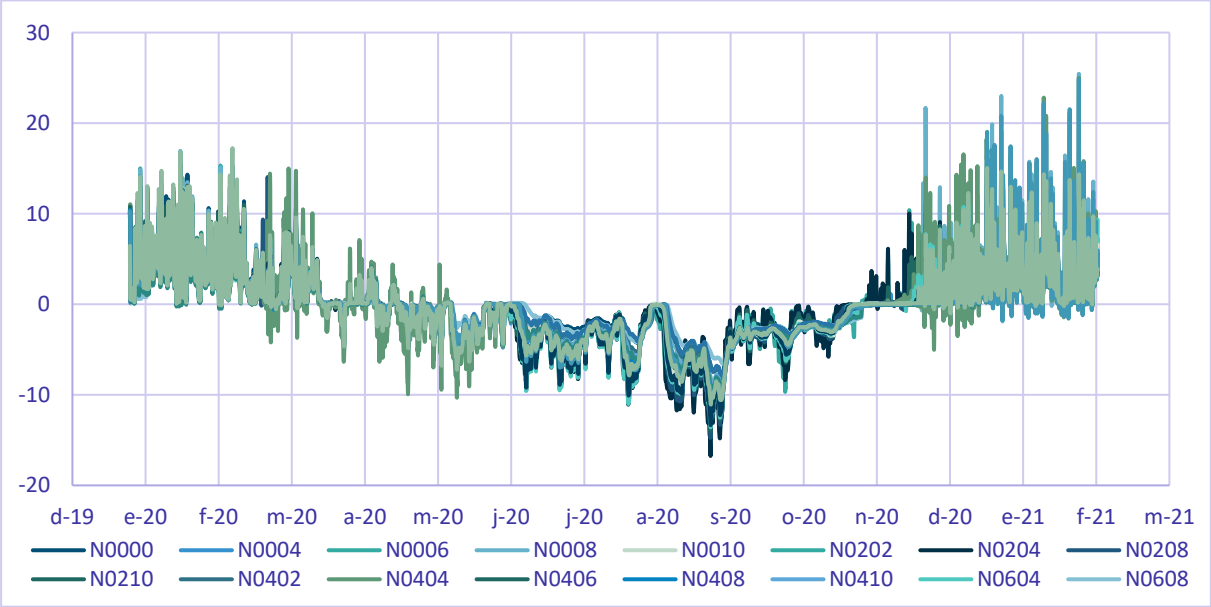

Figura 8: *Temperatura superficial distribuida por los nodos pares de la malla CALM Crater Lake de la isla Decepción, medida entre diciembre de 2019 y enero de 2021.*

Espesor de cubierta nival distribuida

Los termonivómetros situados en los emplazamientos CALM, disponen de una mayor cantidad de sensores (15) que lo instalados en las estaciones TSP (7), con el fin de permitir obtener el espesor de la cubierta nival con mayor precisión, lo que, al estar distribuidos por la malla CALM, permite, a su vez, un estudio de 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.

Los datos de estos termonivómetros (Fig. 9) muestran un comportamiento muy similar a los de los termonivómetros de las estaciones TSP (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 (o reduciendo) el espesor de la cubierta de nieve. El análisis preliminar de estos datos permite establecer que el espesor de nieve ha rondado los 80 cm-90 cm de espesor, lo que es ligeramente menos que en años anteriores. La presencia de periodos isotermos a 0ºC solo es claro en los sensores más bajos, indicando que la capa de hielo subnival que se forma en primavera una vez que se inicia el proceso de descongelación de la capa de nieve, ha sido de unos 15-20 cm.

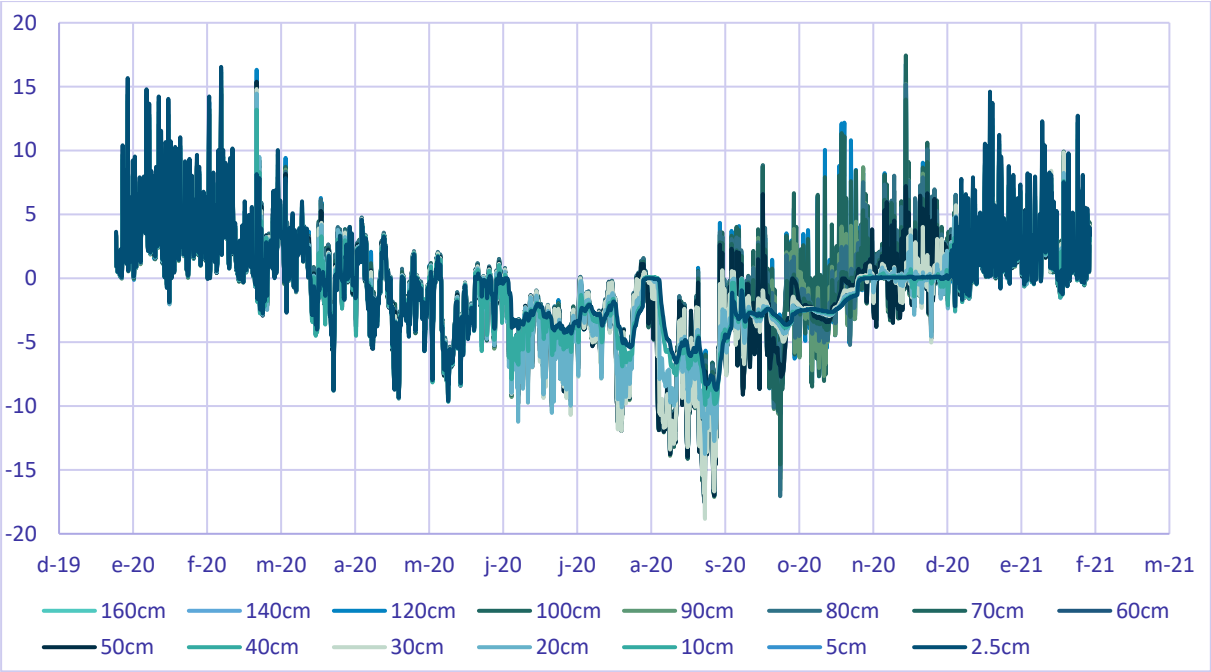

Figura 9: *Ejemplo de temperaturas del aire a distintas alturas registradas por los sensores de un termonivómetro de alta resolución de entre los situados en la malla CALM Crater Lake en isla Decepción, utilizados para el estudio del espesor de nieve distribuida por dicha malla.*

Parámetros nivométricos

La estación nivométrica registró datos válidos hasta el 1 marzo en todos los sensores de sus instrumentos. Sin embargo, a partir de esa fecha solo se consideran datos válidos los tomados por instrumentos exentos a la estructura principal de la estación: sensor de radiación, de temperatura del suelo y de la nieve, y peso de la nieve. Pero incluso en estos instrumentos se ha detectado, como consecuencia de un corte de energía, pérdida de datos entre el 11 de agosto y el 13 de noviembre de 2020, momento en el que volvieron a funcionar de nuevo tras recuperarse la batería.

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 TSP (Fig. 2), y la humedad del aire se mantuvo entre valores del 60 y el 100% en todo el periodo de descongelación. Cabe destacar que no se ve una importante reducción de la humedad ambiental en relación con el pico de calor ocurrido el 9 de febrero de 2020.

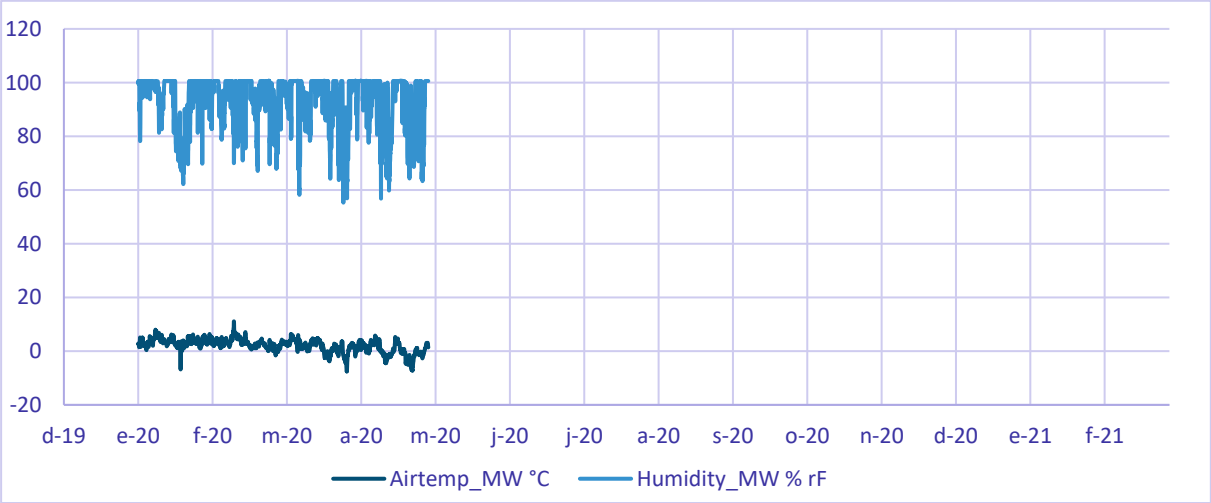

Figura 10: *Datos validos de temperatura y humedad relativa del aire registrados en la estación nivométrica entre el 1 de enero y el 1 de marzo de 2020.*

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 finales 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. Cabe

destacar que tampoco se detecta mayores valores de los esperables relacionados con el pico de temperatura del aire del 9 de febrero de 2020.

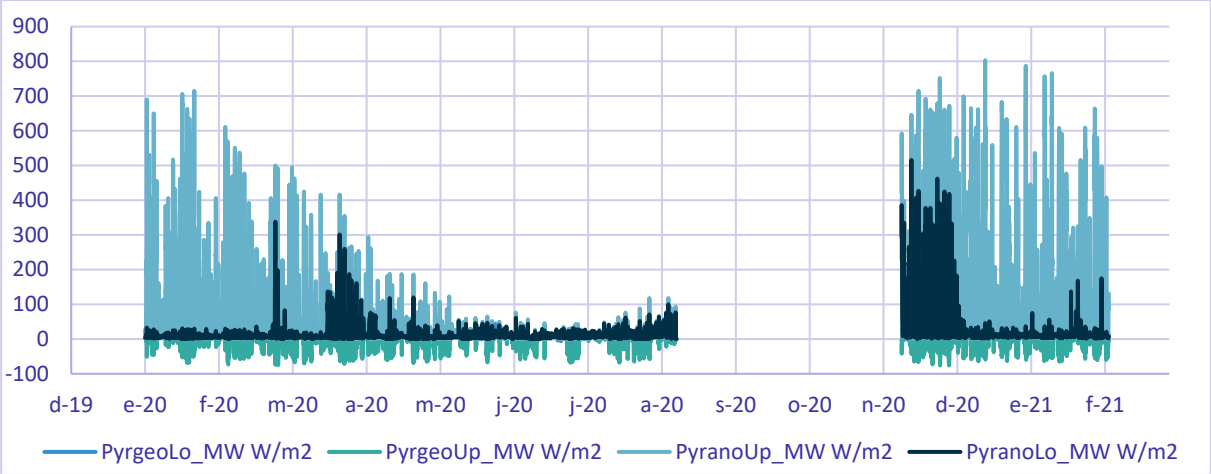

Figura 11: *Datos de radiación solar incidente y reflejada medidos por los sensores piranómetro y pirgeometro instalados en la estación nivométrica.*

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 de nieve menores, de unos 60 cm, que los medidos en los termonivómetros. Esto puede estar relacionado con la posición diferente que ocupa la estación nivométrica con respecto a los termonivómetros en la malla del CALM Crater Lake, donde la nieve se acumula con distintos espesores en cada sector.

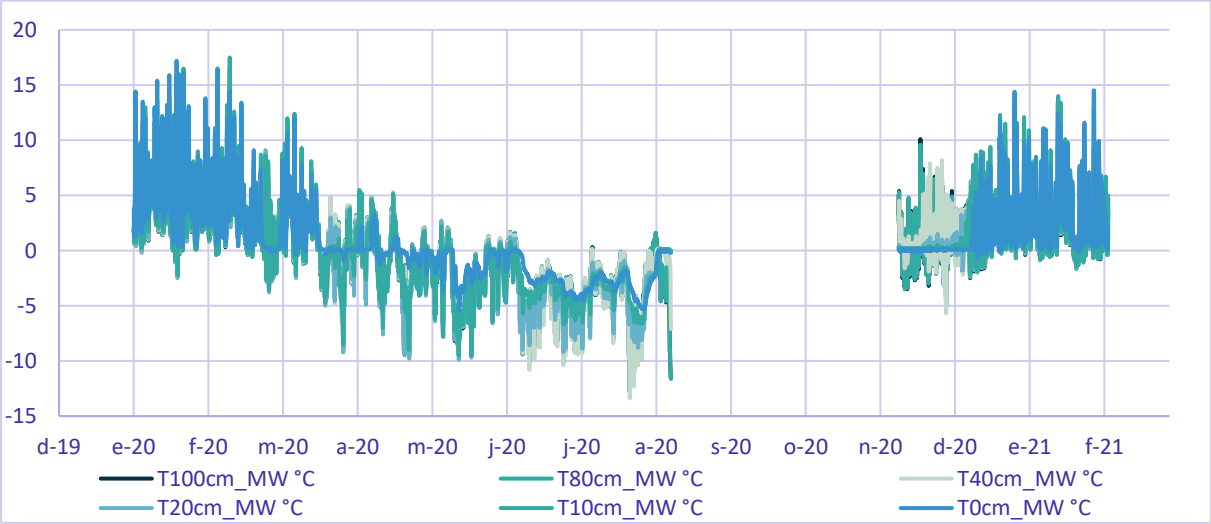

Figura 12: *Temperatura del suelo y temperatura de la nieve en los sensores instalados en la estación nivométrica en el CALM de Crater Lake, isla Decepción.*

Los sensores para la obtención de parámetros de la nieve (contenido e agua, contenido en hielo, densidad, y equivalente en agua) funcionaron perfectamente hasta el 1 mayo de 2020 (Fig. 13), momento a partir del cual, los sensores no dañados, estuvieron registrando datos erróneos debido al cambio de posición de la estación. Es de destacar que los sensores fueron capaces de detectar, como en años anteriores, cambios de las propiedades de la nieve con espesores de tan solo 10 cm o más.

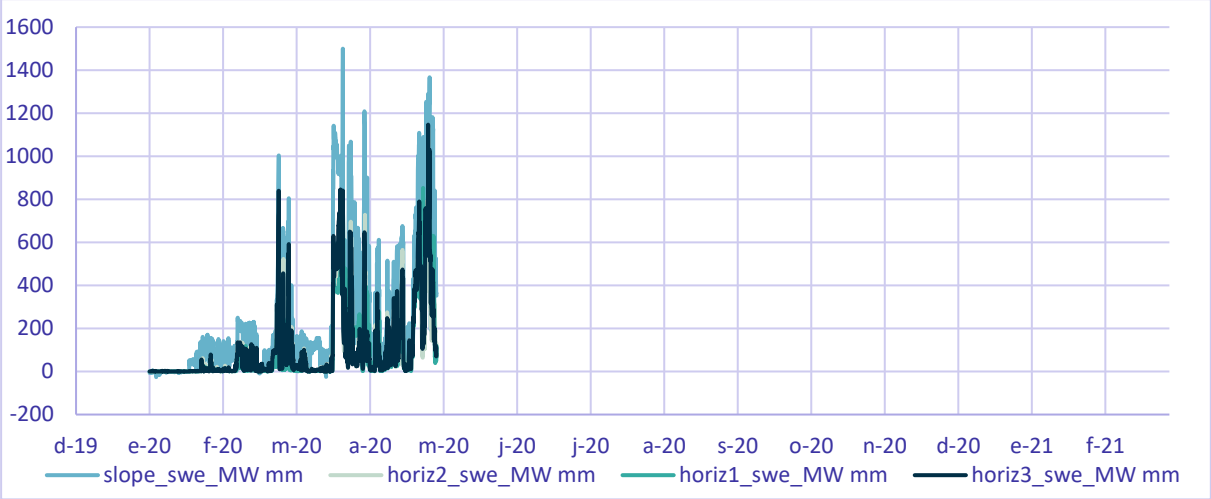

Figura 13: *Medidas de equivalente en agua (SWE) de la nieve medidos a distintas alturas sobre el terreno y para el conjunto del paquete de nieve, como ejemplo de los parámetros nivométricos registrados por hasta el 1 de mayo de 2020.*

Por otro lado, aunque el detector de espesor de nieve por ultrasonidos tampoco aportó datos válidos desde el 1 de mayo, la balanza de nieve fue capaz de detectar el incremento el peso de la nieve a medida que aumentaba el espesor no registrado de la misma, alcanzándose un máximo relativo de más de 150 kg/m^2 a finales del invierno, y antes del inicio de la descongelación (Fig. 14).

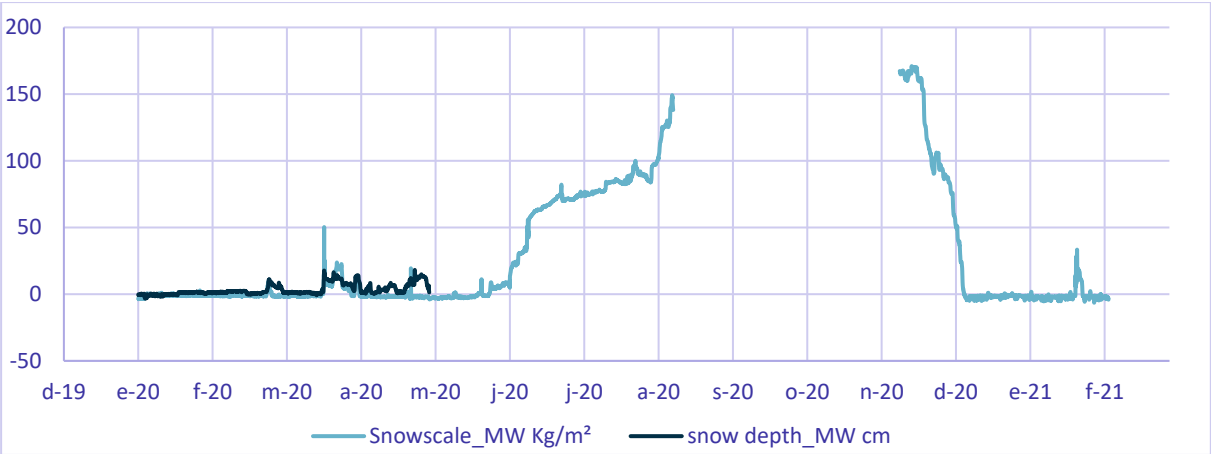

Figura 14: *Datos de espesor (cm) y peso (kg/m^2) de la cubierta nival registrado por la estación nivométrica mostrando los cortes debidos a la caída de la estación, y a la posterior pérdida de energía.*

Imágenes fenomenológicas

De las tres cámaras fenomenológicas operativas en el entorno del CALM Crater Lake en isla Decepción, dos de ellas presentaron fallos diversos que llevaron a la ausencia de imágenes, o a su invalidez. Sin embargo, las imágenes disponibles (Fig. 15) permiten estudiar la evolución de las condiciones y fenómenos meteorológicos día a día en la zona en la que se encuentra el sitio CALM y las estaciones TSP de este lugar.

De esta forma, también se puede observar la evolución de la cubierta de nieve a lo largo del año. Así gracias a las imágenes es posible, por ejemplo, determinar que, aunque se han producido importantes nevadas en el otoño austral entre marzo y abril, no es hasta mediados-finales de mayo cuando se acumula una capa de nieve que, en algunos puntos, ya no se retira hasta el final del invierno, a mediados de diciembre. En concreto, el 18 de diciembre quedarían ya libres de nieve todos los termonivómetros instalados en la zona (Figs. 3 y 9). La fecha de la llegada de las nieves permanentes es muy tardía con respecto a años anteriores, lo que podría explicar que los espesores de nieve tampoco sean tan elevados como los derivados a partir de los datos de los termonivómetros en otros años.

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. Esto ocurre vinculado a las fuertes tormentas de nieve del invierno antártico. Aunque no permite observar le terreno, si conocer el tipo de condiciones ambientales que se dan en esos días. En el año 2020 se han detectado más días en los que las lentes han estado cubiertas de nieve, relacionado con una mayor incidencia de las tormentas de nieve, y no tanto con las temperaturas bajas, pues las mínimas temperaturas registradas este año son mayores que las de años anteriores.

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, detectándose la formación de la banquisa y su desaparición, o 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 15: *Imágenes tomadas por las cámaras fenomenológicas instaladas en la zona del CALM de Crater Lake en isla Decepción, tomadas a finales de mayo de 2020, por la cámara antigua (arriba) y moderna (centro) instaladas en el mismo punto, así como la otra cámara moderna situada al lado opuesto de la malla CALM (abajo).*

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.

Otros datos

Además de los datos tomados en las estaciones TSP (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.

- **Imágenes en espectro infrarrojo**: tomadas con una cámara portátil *FLIR E60*, se han realizado fotografías de la zona ocupada por el CALM de Crater Lake (Fig. 16), con el fin de poder ser comparadas posteriormente con los datos de temperatura superficial distribuida (Fig. 8). Se ha realizado una sola vez durante la campaña, aunque por la prevalencia de condiciones meteorológicas adversas no se pudo hacer en un día despejado, por lo que se plantea repetirse en futuras campañas

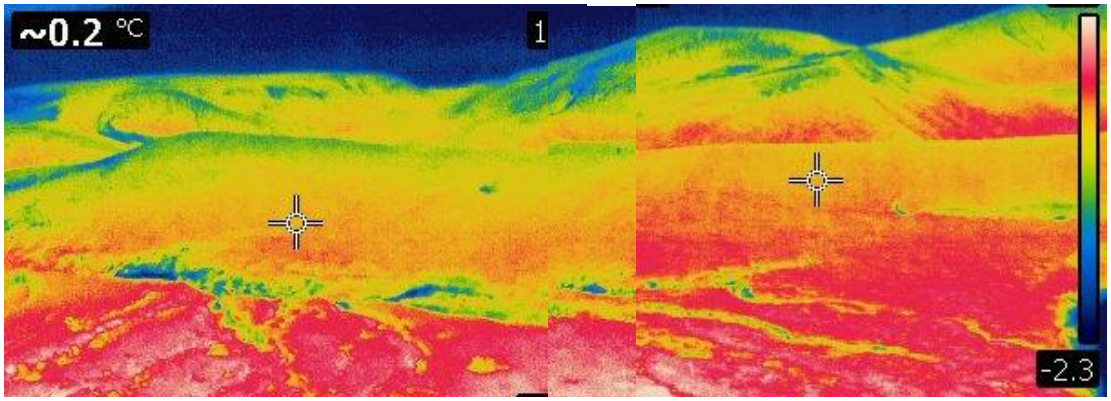

Figura 16: *Mosaico de imágenes térmicas centrado en el emplazamiento del CALM de Crater Lake en isla Decepción, Antártida.*

- **Contenido volumétrico de agua**: medido con el dispositivo de *Campbell Scientific Hydrosense II* y un sensor *CS659* de 12 cm, ambos, se tomaron datos en una selección de nodos de la malla CALM de Crater Lake (Fig. 17) con el fin de, a posteriori, correlacionar los datos de espesor de la capa activa (Fig. 6) y de temperatura superficial medida en los nodos (Fig. 9) y de temperatura en infrarrojo (Fig. 16). La localización de los nodos, además de con las coordenadas relativas de los mismos, se realizó con un GPS de mano *Garmin Etrex 30x*.

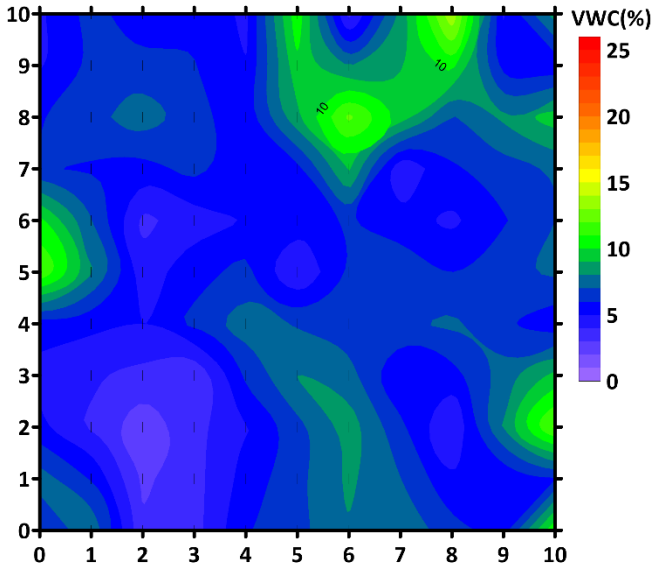

Figura 17: *Contenido volumétrico en agua (%) medido en el CALM de Cráter Lake en febrero de 2021.*

- **Temperatura superficial por infrarrojos**: medido con un dispositivo *IR thermometer Fluke 62 mini*, se tomaron datos de temperatura de la superficie en una selección de nodos, para, al igual que en el caso del contenido volumétrico de agua (Fig. 18), correlacionar a posteriori con los datos de espesor de la capa activa, la temperatura superficial distribuida, y las imágenes infrarrojas. La localización de los puntos medidos se realizó tanto con coordenadas relativas de la malla CALM, como con el GPS integrado en el dispositivo, como con un GPS de mano *Garmin Etrex 30x*.

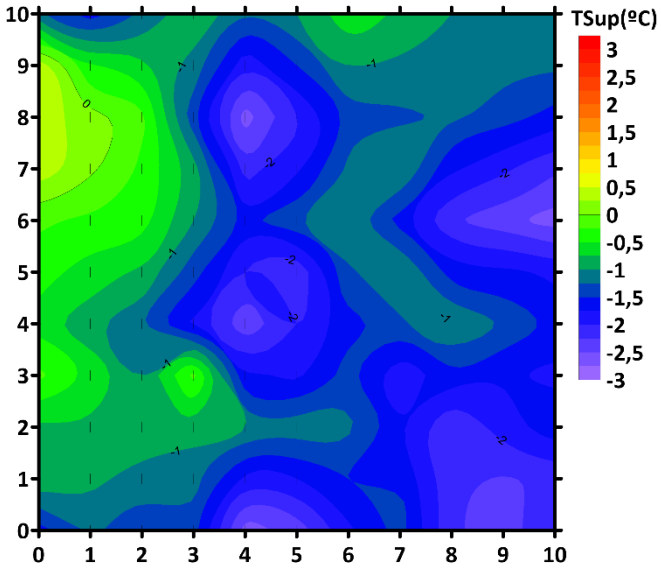

Figura 18: *Temperatura superficial por infrarrojos medida en los nodos de la malla CALM de Crater Lake en isla Decepción, Antártida.*

Planes de futuro

Mantenimiento de las estaciones

Tras la realización de la campaña 2020-21, se prevén necesidades de mantenimiento en los instrumentos o soportes de las siguientes estaciones TSP y CALM:

Limnopolar Lake:

- Aunque el emplazamiento no ha sido visitado, ya se preveía la necesidad de realizar un cambio del mástil del sensor de temperatura del aire, que se encuentra fuertemente oxidado.
- Retirada de la cámara fotográfica automática CC640 ya obsoleta.
- Reinstalar las piquetas que delimitan el perímetro del sitio CALM, midiendo las diferencias de distancia.
- Guardar la cuerda de medida del espesor de la capa activa en el módulo laboratorio del Campamento Internacional Byers, junto con la sonda manual que actualmente se guarda en dicho emplazamiento.

Nuevo incinerador:

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

Incinerador

- Instalar un sensor adicional a 230 cm de profundidad

Morrena:

- Reemplazo de mástil del termonivómetro, fuertemente erosionado y desgastado por la actividad eólica.

Glaciar:

- Revisión de la electrónica de la estación registradora de datos, por fallos diversos.
- Revisar el estado del sondeo para establecer si existe hielo en su interior tras varios años sin acceso al mismo.

Sofía:

- Revisión de la electrónica de la estación registradora de datos, por fallos diversos.
- Intentar recuperar el sondeo de 90 cm

Crater Lake:

- Retirada de la cámara fotográfica automática CC640 ya obsoleta.
- Asegurar la estación nivométrica con piquetas metálicas clavadas en el permafrost para evitar problemas de volcado.
- Crear una nueva cuerda para la medida del espesor de la capa activa, con la idea de quedar guardada en la BAE Gabriel de Castilla, reduciendo así la complejidad logística del mantenimiento de las estaciones.

Plan de mejora

De cara a las siguientes campañas, se plantea la sustitución paulatina, pero lo más rápido posible, de los sensores de temperatura *iButton* y *Tinytag* de los experimentos de temperatura del aire, de la superficie y del terreno de todas las estaciones TSP, por dispositivos registradores M-Log5W-CABLE y M-Log5W-String de *Geoprecision GmbH,* con cadenas de sensores tipo TNode y TNodeX fabricadas a medida. El objetivo es mejorar la resolución de los sensores instalados, a la vez que reducir el tiempo y la complejidad del volcado de datos y el mantenimiento de las estaciones, ya que tienen capacidad de uso de hasta 5 años sin reemplazar la batería, y memoria para medidas horarias por muchos más años. El volcado de datos se realiza de forma inalámbrica con un dispositivo de comunicación de radio a 433 Mhz conectado a un equipo portátil vía USB, por lo que no se requiere de sacar los sensores ni los registradores de datos de su sondeo, ni desmontarlos de su ubicación.

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. Pero el interés primero por la rápida sustitución de todos los sensores es mantener la consistencia de la instrumentación de la red, y permitir la comparativa entre los datos de as diversas estaciones, reduciendo al máximo posible la coexistencia de distintos tipos de sensores para los mismos tipos de instrumento. Las limitaciones presupuestarias condicionarán, por tanto, el avance de este plan de mejora.

En una segunda fase, se realizará la sustitución de los sensores que constituyen los termonivómetros, buscándose en este momento dispositivos alternativos que permitan de la misma manera, reducir las tareas de mantenimiento y mejorar la resolución de los datos tomados.

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 corre a cargo de 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 que juegan los técnicos y dotaciones de las bases sin cuyo apoyo no sería posible en muchas ocasiones desarrollar el mantenimiento debido a los fallos catastróficos que se pueden dar y para los que inicialmente no se cuenta con material de repuesto. Su pericia y apoyo incondicional hace posible que a pesar de todos los inconvenientes las estaciones TSP y sus instrumentos 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, 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.

Referencias

de Pablo, M., Ramos, M., Molina, A., Vieira, G., Hidalgo, M., Prieto, M., Jiménez, J., Fernández, S., Recondo, C., Calleja, J., Peón, J., & 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., 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.

Anexo I: Acrónimos

TSP	*Thermal State of Permafrost*
CALM	*Circumpolar Active Layer Monitoring*
GTN-P	*Global Terrestrial Network for Permafrost*
IPA	*International Permafrost Association*
UL	*Universidade de Lisboa*
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”
CB	Campamento Byers
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
UTM	Unidad de Tecnología Marina
CSIC	Consejo superior de Investigaciones Científicas
CPE	Comité Polar Español
CNDP	Centro Nacional de Datos Polares
UAH	Universidad de Alcalá
NSF	*National Science Foundation*

Universidad de Alcalá

PERMATHERMAL

Universidad de Alcalá